LICIANE CÂNDIDA PATACA

**IDENTIFICAÇÃO MODAL A PARTIR DE DADOS AMBIENTE
EM SISTEMAS COM GERAÇÃO SÍNCRONA DISTRIBUÍDA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos.

SÃO CARLOS
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P294i Pataca, Liciane Cândida
Identificação Modal a partir de Dados Ambiente em
Sistemas com Geração Síncrona Distribuída/ Liciane
Cândida Pataca; orientador Rodrigo Andrade Ramos. São
Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Geração Distribuída. 2. Estabilidade a Pequenas
Perturbações. 3. Análise de sinais. 4. Técnicas
Estimação Modal. 5. Dados Ambiente. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LICIANE CÂNDIDA PATACA.**

Título da dissertação: "Identificação modal a partir de dados ambiente em sistemas com geração síncrona distribuída".

Data da defesa: 11/09/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Rodrigo Andrade Ramos (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Dr. **Nelson Martins**
(Centro de Pesquisa de Energia/CEPEL-RJ)

Aprovada

Prof. Titular **Geraldo Roberto Martins da Costa**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Ao Adriano, por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agraceço a Deus, pela vida.

À Universidade de São Paulo, por tudo que aprendi e por quem me tornei desde que iniciei meus estudos em São Carlos. Universidade que faz parte da minha história.

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo Andrade Ramos, pela orientação desta pesquisa e por todo o apoio nestes últimos anos.

Aos colegas de pesquisa, Edson e Tatiane, que tanto contribuíram neste trabalho.

À minha mãe Eunice, por acreditar em mim. Sempre.

Ao Adriano, pelo carinho, pela paciência e pela ajuda fundamental neste trabalho.

Ao amigo irmão Ricardo, por nossa grande amizade e pelas revisões gramaticais do texto.

Às pessoas com quem encontrei nesta jornada e que, de alguma forma, contribuíram naquilo que sou.

Sou Grata.

“And most important, have the courage to follow your heart and intuition. They somehow already know what you truly want to become.”

(Steve Jobs, 2005)

RESUMO

PATACA, L. C. (2015). ***Identificação Modal a partir de Dados Ambiente em Sistemas com Geração Síncrona Distribuída***. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

O crescimento da demanda por eletricidade tem promovido a diversificação da matriz energética em termos de fontes primárias, porte de geração e alocação dos geradores. Neste cenário, a inserção de geradores de pequeno porte nos sistemas de distribuição tem causado a descentralização da produção de energia elétrica e, no contexto nacional, o alto potencial para geração de eletricidade através de pequenas centrais hidrelétricas e usinas de cogeração tem dado destaque aos geradores síncronos distribuídos. Contudo, é necessário avaliar as implicações da presença dos geradores síncronos em sistemas de distribuição e avaliar se as metodologias já consagradas de análises, operação e normalização técnica estão adequadas. Dentre as principais peculiaridades dos sistemas de distribuição estão a proximidade dos geradores às cargas e a presença de eventos aleatórios de maior amplitude, tais como variações de carga que ocorrem natural e intermitentemente no sistema. Além disso, problemas relacionados a oscilações eletromecânica mal amortecidas podem agora ocorrer em níveis de distribuição e deve-se estabelecer um procedimento para identificação destes modos. Entretanto, o procedimento usual para o estudo de estabilidade a pequenas perturbações pode se tornar inviável, pois a construção do modelo completo é de extrema complexidade e os parâmetros dos elementos em níveis de distribuição são de difícil obtenção. Para reverter estes problemas citados, esta pesquisa oferece um procedimento alternativo para a obtenção dos modos de oscilação eletromecânica em sistemas de distribuição, sugerindo a estimação modal através de dados ambiente.

Palavras-Chave: geração distribuída, estabilidade a pequenas perturbações, análise de sinais, técnicas de estimação modal, dados ambiente.

ABSTRACT

PATACA, L. C. (2015). *Modal Identification from Ambient Data in Systems with Distributed Synchronous Generation*. Dissertation (M. Sc. Degree), São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

The electricity demand increase has promoted the energy matrix diversification in terms of primary sources, generation size and allocation of generators. In this scenario, the insertion of small sized generators in distribution systems has caused the power production decentralization and, in the national context, a high potential for generating electricity through small hydroelectric power plants and cogeneration plants has drawn attention to distributed synchronous generators. However, it is necessary to assess the implications of synchronous generators presence in distribution systems and evaluate if the current methodologies of analysis, operation and technical standards are appropriate to this context. Among the main distribution systems particularities, there are the proximity of generators to loads and more significant random perturbations conceptualized as load switching. In addition, problems related to lightly damped modes can occur in distribution and there is a need to establish a procedure for modal identification. However, the usual procedure for the small-signal stability analysis is not adequate to this problem, because the model construction is very complex and the parameters in distribution are very difficult to obtain. To face the challenges, this research provides an alternative procedure for obtaining electromechanical modes in distribution systems, suggesting modal estimation techniques that use measured ambient data.

Keywords: distributed generation, small-signal stability, signal analysis, modal estimation techniques, ambient data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Empreendimentos em operação.	12
Figura 2 - Mapa de produção de cana-de-açúcar no Brasil.	15
Figura 3 - Mapa das CGHs e PCHs no Brasil (<i>Fonte: SIGEL</i>).	16
Figura 4 - Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência	21
Figura 5 - Tipos de instabilidade de ângulo de rotor sob pequenas perturbações. ...	24
Figura 6 - Lugar geométrico dos polos da matriz A considerado como indicador satisfatório de margem de estabilidade a pequenas perturbações	30
Figura 7 - Exemplos de transitórios utilizados na identificação modal adaptado de (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).....	33
Figura 8 - Diferentes respostas de um mesmo sistema dinâmico.	34
Figura 9 – Abordagens para identificação dos modos eletromecânicos.	35
Figura 10 - Fluxograma do Método N4SID.....	51
Figura 11 - Diagrama unifilar.....	54
Figura 12 - Modelo do regulador de velocidade.	57
Figura 13 - Modelo do regulador de tensão.....	58
Figura 14 - Modelo do controlador de fator de potência.....	58
Figura 15 - Modelo do regulador de fator de potência.....	59
Figura 16 - Resposta da frequência diante da pequena perturbação para os casos 1, 2 e 3.....	63

Figura 17 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para o Caso 1 com variação aleatória de 10% carga ativa.	65
Figura 18 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 40% carga ativa.	66
Figura 19 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 60% carga ativa.	66
Figura 20 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 80% carga ativa.	67
Figura 21 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 1. .	70
Figura 22 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 2. .	70
Figura 23 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 3. .	71
Figura 24 - Variações aleatórias de 10 % da potência ativa na barra 2.....	72
Figura 25 – Velocidade angular de rotor para o sistema estimulado por variações aleatórias de carga.	73
Figura 26 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 1.	76
Figura 27 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 2.	76
Figura 28 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 3.	77

Figura 29 - Sinais de velocidade angular de rotor no tempo com variação de porcentagem de carga aleatória e pequena perturbação no Caso 1.	81
Figura 30 - Diagrama unifilar do SIN.	82
Figura 31 - Região de conexão da planta de cogeração (<i>Fonte:EPE</i>).	82
Figura 32 - Diagrama unifilar do sistema conectado ao SIN.	83
Figura 33 - Resposta da velocidade angular diante da perturbação aplicada ao sistema conectado ao SIN.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Empreendimentos em operação.	12
Tabela 2: A biomassa na matriz de energia elétrica.....	14
Tabela 3: Dados das barras para o fluxo de carga.....	55
Tabela 4: Dados das linhas de transmissão e transformador que conectam as barras.....	56
Tabela 5: Constantes de tempo dos geradores.....	56
Tabela 6: Parâmetros dos geradores.	56
Tabela 7: Parâmetros do regulador de velocidade.....	57
Tabela 8: Parâmetros do regulador de tensão.	58
Tabela 9: Parâmetros do controlador de fator de potência.	59
Tabela 10: Parâmetros do regulador de tensão.	59
Tabela 11: Modos de oscilação eletromecânica pelo PacDyn	61
Tabela 12: Modos de oscilação eletromecânica pelo método Prony.....	63
Tabela 13: Modos de oscilação eletromecânica pelo método Prony com ruído.....	67
Tabela 14: Desvio padrão e média das diferenças do Prony com relação aos resultados base.....	69
Tabela 15: Modo de oscilação eletromecânica pelo método N4SID com dados ambiente.	74
Tabela 16: Desvio padrão e média das diferenças do N4SID com relação aos resultados base.....	75

Tabela 17: Avaliação da influência da janela de simulação na técnica N4SID.	78
Tabela 18: Avaliação da influência da janela de simulação na técnica N4SID (continuação).....	78
Tabela 19: Modos eletromecânicos pelo método N4SID com pequena perturbação e ruído.	79
Tabela 20: Barras do SIN em que são inseridas perturbações aleatórias.	84
Tabela 21: Modo de oscilação eletromecânica pelo método Prony para sistema com o SIN.....	85
Tabela 22: Modos de oscilação eletromecânica pelo N4SID para o sistema conectado ao SIN.	87
Tabela 23: Resultados obtidos pelo N4SID para o ruído apenas do SIN.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BIG	Banco de Informações de Geração
CA	Corrente alternada
CDU	Controlador Definido pelo Usuário)
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EOL	Central Geradora Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GPS	Global Positioning System
IEEE	The Institute of Electrical and Electronic Engineers
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MPLD	Modelo de Predição Linear Discreta
MVA	Mega Volt-Ampere
MVA _r	Mega Volt-Ampere reativo
MW	Mega Watt
N4SID	<i>Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIGEL	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMSF	Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
ÚNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
USP	Universidade de São Paulo
UTE	Usinas Termoeletricas
UTN	Usina Termonuclear

LISTA DE SÍMBOLOS

x	vetor de estados
u	vetor de entrada de controle
A	matriz de estados com dimensão nxn
B	matriz de entrada de controle com dimensão $n \times r$
C	matriz de saída com dimensão $m \times n$;
D	matriz de transmissão direta com dimensão $m \times r$
λ	autovalor associado à matriz A
ω	frequência de oscilação em rad/s
σ	decaimento de amortecimento
f	frequência de oscilação em Hz
ζ	fator de amortecimento
v	vetor de entradas aleatórias que perturbam o sistema
μ	sinal do ruído de medição
$U_{0 L-1}$	matriz entrada de Hankel
$Y_{0 L-1}$	matriz saída de Hankel
L	número de blocos linha
$\mathcal{O}_L$	matriz de observabilidade
$\mathcal{C}_L$	matriz de controlabilidade
ψ_L	matriz de Toeplitz
p	sub-índice estados passados
f	sub-índice estados futuros
L	matriz triangular inferior da decomposição LQ
Q	matriz ortogonal da decomposição LQ
U	matriz quadradas ortogonais ou unitárias à esquerda da SVD
Σ	matriz diagonal de valores singulares da SVD
V	matriz quadradas ortogonais ou unitárias à direita da SVD

T'_{do}	constante de tempo transitória de eixo d
T''_{do}	constante de tempo subtransiente de eixo d
T'_{qo}	constante de tempo transitória de eixo q
T''_{qo}	constante de tempo subtransiente de eixo q
H	constante de inércia
x_d	reatância de eixo direto
x'_d	reatância transitória de eixo direto
x''_d	reatância subtransitória de eixo direto
x_q	reatância de eixo quadratura
x'_q	reatância transitória de eixo quadratura

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
SUMÁRIO	xv
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Motivação da Pesquisa	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Estrutura da Dissertação.....	8
Capítulo 2 - GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	11
2.1. Definição de Geração Distribuída	11
2.2. Matriz de Energia Elétrica e a Geração Distribuída no Contexto Nacional ..	12
2.2.1. Usinas Termelétricas a Biomassa	13
2.2.2. Aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte.....	15
2.3. Regulamentação	17
Capítulo 3 - ANÁLISE MODAL	19
3.1. Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência	19
3.2. Estabilidade de Ângulo de Rotor sob Pequenas Perturbações.....	24
3.3. Análise Linearizada.....	25
3.3.1. Os modos de Oscilação Eletromecânica	28
3.4. Identificação Modal	31
3.5. Estimação com Distúrbios - Métodos de <i>Ringdown Analysis</i>	36
3.5.1. Método de Prony	37

3.6. Estimação com Dados Ambiente - <i>Mode-Meter Algorithms</i>	43
3.6.1. Formulação do problema sob condições de dados ambiente	44
3.6.2. Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification - N4SID	46
Capítulo 4 - RESULTADOS	53
4.1. Cenário de Estudo para o Sistema Equivalente	53
4.1.1. Dados do Sistema Teste	55
4.2. Identificação Modal por Análise Linear utilizando o Modelo - PacDyn.....	61
4.3. Estimação Modal a partir de uma Pequena Perturbação	62
4.3.1. Pequena Perturbação: Ringdown Analysis	62
4.3.2. Pequena Perturbação com dados Ambiente superpostos: Ringdown Analysis.....	64
4.4. Estimação Modal a partir de Dados Ambiente.....	71
4.4.1. Dados Ambiente: resultados com N4SID	72
4.4.2. Dados Ambiente com perturbação: resultados com N4SID	79
4.5. Cenário de Estudo para o Sistema Conectado ao SIN.....	81
4.5.1. Pequena Perturbação sem ruído no SIN: Resultado base de comparação.	85
4.5.2. Dados Ambiente no sistema conectado ao SIN: resultados com N4SID....	86
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICES	99
I - SOLUÇÃO DE UM SISTEMA LINEAR	99
I.1. Resposta do Sistema Linear a uma Condição Inicial	99
I.2. Resposta Completa de um Sistema Linear	101
II - MODELO DE VARIAÇÃO ALEATÓRIA DAS CARGAS	103

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O sistema elétrico brasileiro teve seu surgimento nas últimas décadas do século XIX e sua primeira hidrelétrica foi inaugurada no ano de 1883: a Usina Hidrelétrica Ribeirão do Inferno, com potência instalada de 12kW e localizada na cidade de Diamantina no estado de Minas Gerais (ALMEIDA, 2008), (CCEE, 2015). Este primeiro período compreendido até a década de 30 do século XX é caracterizado pela implantação das primeiras instalações elétricas e construção das primeiras usinas de geração. Neste cenário inicial, as primeiras unidades geradoras eram localizadas próximas aos centros de consumo. Contudo, com o passar do tempo e com o crescimento contínuo deste setor e da demanda por energia elétrica, grandes hidrelétricas começam a ser construídas para o suprimento de carga, estando estas unidades sujeitas à localização dos recursos naturais. Além disso, para suprir esta crescente demanda em diferentes localidades geográficas, visando manter o fornecimento ininterrupto aos consumidores, são criadas várias interconexões no sistema através de longas linhas de transmissão para que a energia possa ser transmitida por longas distâncias. Consequentemente, estes fatores ocasionam a **centralização** do sistema elétrico, ou seja, grandes centros fornecedores de energia distantes dos consumidores finais. Um marco para o sistema centralizado foi a construção da Usina de Itaipu que teve sua operação inicializada em 1984. Esta usina de grande porte tem 14.000 MW de potência instalada e grande parte de sua energia é transmitida por mais de 800 km de Foz do Iguaçu, no Paraná, até Ibiúna no estado de São Paulo.

Para este tipo de sistema centralizado podem ser identificadas três funções bem definidas em um sistema de potência, que são a de **geração**, que converte a fonte primária de energia em energia elétrica; a **transmissão**, que transmite esta energia gerada por longas distâncias até as subestações próximas aos centros de consumo; e a **distribuição**, responsável pelo fornecimento da energia ao consumidor final.

Ainda nesta realidade de crescimento contínuo da necessidade por energia elétrica, começa a surgir a necessidade da utilização de diferentes fontes de energia e a busca pela diversificação da matriz de energia elétrica para garantir uma maior confiabilidade do sistema interligado. Além disso, os requisitos ambientais para empreendimentos do setor elétrico vem se tornando cada vez mais rigorosos, se convertendo em um aspecto muitas vezes impeditivo ou restritivo para empreendimentos de grande porte.

Desta forma, fontes alternativas e fontes renováveis de energia passam a ter destaque no setor e nas políticas energéticas nacionais, tendo grandes investimentos na implantação de unidades de geração de menor porte, muitas vezes nas proximidades dos centros de consumo.

O sistema passa então a sofrer um processo de **descentralização**, ou seja, passa a se valer também de unidades menores de geração próximas aos centros de consumo, que dispensam as longas linhas de transmissão para atender o consumidor final.

Assim, surge um importante conceito atual em sistemas elétricos de potência (SEP) que é denominado **Geração Distribuída** (GD), que significa, de um ponto de vista amplo, a geração de energia elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores, sem a necessidade do transporte de energia através da rede de transmissão. Ou seja, tais geradores são conectados diretamente às redes de subtransmissão, distribuição ou ao próprio consumidor.

A geração distribuída pode ter por fontes primárias as energias eólica, solar, biomassa ou hidráulica, dentre outras, e os mecanismos de geração podem ser por geradores de indução (como os geradores eólicos), de corrente contínua (painéis fotovoltaicos) ou geradores síncronos (hidrogeradores ou turbogeradores).

O escopo deste trabalho é a análise de sistemas com a presença de geradores distribuídos do tipo síncrono. Tal objetivo se justifica em função do grande potencial brasileiro para a geração de energia elétrica através de empreendimentos de co-geração e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) onde, em ambos os casos, são utilizados geradores síncronos para geração de energia elétrica.

A co-geração consiste na produção combinada de calor e eletricidade, onde o calor residual do processo de produção de eletricidade é aproveitado para produzir energia térmica útil. No contexto nacional se destacam as usinas de açúcar e álcool, também chamadas de sucroalcooleiras, que necessitam de energia térmica para o aquecimento de caldeiras. Elas utilizam como combustível o bagaço da cana e por esta razão são denominadas usinas termoelétricas (UTE) a biomassa.

As PCHs também se destacam no país sendo usinas hidrelétricas de porte reduzido e foram classificadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Resolução nº 652 de 2003 como empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW.

Estes dois tipos de empreendimentos tem sido vastamente empregados no sistema elétrico brasileiro e tem apresentado diversas vantagens para o setor como a contribuição para a diversificação da matriz energética utilizando fontes renováveis, a redução e a dispersão dos impactos ambientais, a redução das perdas na transmissão e de seus custos de ampliação, o atendimento mais rápido ao crescimento da demanda e o aumento da confiabilidade do fornecimento aos consumidores locais.

Apesar destas vantagens, a operação de geradores em níveis de distribuição ainda é um desafio e diversas pesquisas tem sido desenvolvidas sobre este tema. É necessário agora avaliar quais são os impactos da geração distribuída em circuitos inicialmente projetados para serem somente circuitos passivos (ou seja, sem elementos ativos como unidades geradoras) e com características bem distintas dos sistemas de transmissão aos quais os geradores eram anteriormente conectados. Com estes estudos é possível definir os novos procedimentos operativos e normas para a distribuição, de forma a adequar a sua operação neste novo cenário.

Dentre estas diversas pesquisas que devem ser realizadas, este trabalho propõe uma forma diferenciada de avaliação do comportamento dinâmico do sistema enfocando a estabilidade de ângulo de rotor, considerando o sistema com a presença de geradores síncronos distribuídos.

O principal objetivo deste tipo de estudo é a identificação os modos de oscilação eletromecânica, que são indicadores específicos de frequência e amortecimento das oscilações entre as partes mecânicas e elétricas dos geradores síncronos.

Até então, os estudos de estabilidade a pequenas perturbações eram realizados exclusivamente considerando sistemas de grande porte em níveis de transmissão. Assim, foi desenvolvido um procedimento de modelagem, simulação e avaliação de resultados baseado nas características destes sistemas. Como a presença de geradores em sistemas de distribuição faz com que estes também estejam sujeitos aos fenômenos de instabilidade de ângulo de rotor, deve-se avaliar se a metodologia inicial de identificação dos modos continua adequada ou, se não, propor novos procedimentos e considerações que se adaptem a tal função.

O procedimento para identificação modal de sistemas de grande porte é principalmente baseado na modelagem dinâmica não-linear do sistema a partir de seus parâmetros e assumindo uma operação trifásica balanceada. O modelo passa por uma posterior linearização em torno de um ponto de equilíbrio e o modelo linear final é considerado como o necessário para estes estudos de estabilidade a pequenas perturbações, onde a análise modal é realizada pela análise dos autovalores da matriz de estados do sistema linear.

Já em sistemas de distribuição não é possível realizar as mesmas simplificações do modelo que são admitidas quando a análise é feita em níveis de transmissão. No caso dos estudos a níveis de distribuição, é necessário modelar detalhadamente uma maior quantidade de componentes do sistema, pois estes têm influência significativa em médias tensões. Além do aumento da quantidade de informações e complexidade do modelo, existe uma maior incerteza sobre estes parâmetros e uma maior dificuldade na obtenção e armazenamento atualizado dos mesmos.

Desta forma, a análise modal através da construção do modelo se torna frequentemente inviável em níveis de distribuição e alternativas a esta abordagem devem ser buscadas.

Uma destas alternativas, também já utilizada nos sistemas de transmissão, é a estimação dos modos eletromecânicos baseada em medidas. Esta abordagem utiliza-se de técnicas de processamento de sinais para extração de características da resposta do sistema como frequência e amortecimento das componentes do sinal. Estas estimações podem ser aplicadas em trechos do sinal onde o sistema sofre uma perturbação ou em trechos de regime de operação normal, onde a resposta é ruidosa devido às pequenas variações aleatórias de carga de baixa amplitude às quais o sistema é continuamente submetido em sua operação normal. Estudo desta natureza realizados na transmissão já estão consolidados e apresentam bons resultados. Contudo, os sistemas de distribuição apresentam particularidades que podem influenciar a obtenção dos modos eletromecânicos e que devem ser consideradas para a escolha da melhor técnica de estimação

Uma dessas particularidades é a presença do ruído de entrada do sistema, provocado pelas variações aleatórias de carga de baixa amplitude, que ocorrem em proporção mais significativa em sistema de distribuição, devido a proximidade das cargas a esta rede, do que em sistemas de transmissão onde este ruído aparece mais atenuado.

Este trabalho propõe uma avaliação de algumas técnicas de estimação modal (já amplamente utilizadas em sistemas de transmissão), em sistemas de distribuição por meio de simulações adequadas de um sistema com geração distribuída sujeito a pequenas variações de carga, considerando as peculiaridades citadas anteriormente.

Este projeto de mestrado se insere no grupo de pesquisa *de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Energia Elétrica Operando com Geração Distribuída* do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP). O grupo de pesquisa vem propondo, desde 2011, novas metodologias para o estudo de estabilidade angular e para identificação de modos eletromecânicos em sistemas

com geradores síncronos distribuídos e esta proposta de mestrado enfoca uma das possíveis metodologias de obtenção desses modos em comparação a algumas já apresentadas no grupo de pesquisa.

A principal diferenciação desta proposta, em comparação com as anteriores, é a obtenção dos modos eletromecânicos utilizando dados ambiente. Para tal, serão utilizadas técnicas de processamento digital de sinais próprias para sinais de dados ambiente e uma representação adequada do ruído de entrada existente no sistema.

Os sinais de dados ambiente de sistemas reais utilizados para a detecção dos modos eletromecânicos podem estar disponíveis nos registradores dos reguladores de tensão e reguladores de velocidade instalados nos geradores distribuídos ou podem ser oriundos de sincrofasores quando estes estejam instalados na distribuição. O emprego de Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) tem ganhado atenção em SEPs uma vez que permite o monitoramento em tempo real do sistema através da medição simultânea de grandezas elétricas em instalações distantes geograficamente usando *Phasor Measurement Units* (PMU). Estes dados são sincronizados temporalmente através do sistema *Global Positioning System* (GPS) e podem ser utilizados para monitoramento, controle e proteção do sistema de modo a melhorar sua confiabilidade. Uma das potenciais aplicações deste monitoramento é a análise de oscilações eletromecânicas.

1.2. Motivação da Pesquisa

Com base no exposto anteriormente neste capítulo, as principais motivações que levaram a esta pesquisa foram:

- O aumento da utilização de geradores de pequeno porte nos sistemas de distribuição, principalmente de geradores síncronos, devido ao grande potencial para geração de energia através de PCHs e usinas de co-geração no Brasil.
- A grande incerteza dos parâmetros do sistema em níveis de distribuição, ou mesmo suas indisponibilidades, que inviabilizam a construção de um modelo a partir destes parâmetros.

- A possibilidade de utilização de sinais continuamente amostrados de sistemas reais através do monitoramento em tempo real, o que permite a detecção dos modos eletromecânicos utilizando técnicas de estimação modal.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de mestrado é:

- Identificar os modos de oscilação eletromecânica de um sistema em nível de distribuição com a presença de geradores distribuídos utilizando sinais de dados ambientes.

Os objetivos parciais para a execução do objetivo geral proposto do projeto de dissertação são:

- Utilizar um sistema teste que possua característica de um sistema de distribuição com presença de geração distribuída e que esteja sujeito a pequenas variações aleatórias de carga modeladas adequadamente para excitação de seus modos de oscilação eletromecânica.

- Aplicar uma pequena perturbação sobreposta às variações aleatórias de carga para a avaliação da influência do ruído de entrada em uma técnica do tipo *ringdown*.

- Realizar a identificação dos modos eletromecânicos considerando somente os dados ambiente.

- Conectar o mesmo sistema modelado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) para avaliar a influências de variações aleatórias de carga do SIN no gerador distribuído.

- Comparar e analisar os resultados obtidos neste trabalho para os diferentes cenários considerados.

1.4. Estrutura da Dissertação

O texto da dissertação está organizado de maneira a fornecer os elementos e conceitos necessários à compreensão deste projeto de pesquisa. A contextualização do problema, assim como a abordagem teórica, são apresentadas objetivando a definição clara do problema em questão para, então, apresentar a proposta de solução desenvolvida por esta pesquisa. As referências bibliográficas estão distribuídas ao longo dos capítulos para consulta do leitor. Na sequência são descritos os resumos dos capítulos que compõem o texto:

- *Capítulo 2: Geração Distribuída*

Neste capítulo é feita a contextualização do cenário atual da geração distribuída no Brasil. São fornecidas a definição deste tipo de geração, as características próprias e suas vantagens. São apresentados dados deste tipo de geração na matriz de energia elétrica nacional e como é regulamentada no país. Destaca-se a geração síncrona distribuída, por ser o tipo de geração focado dentro do escopo de estudo deste trabalho.

- *Capítulo 3: Análise Modal*

São apresentadas as definições e classificações do problema de estabilidade em sistemas elétricos de potência com o destaque para estabilidade de ângulo de rotor a pequenas perturbações. Uma vez apresentada a razão pela qual devem ser identificados os modos eletromecânicos em estudos dinâmicos, são citados os principais procedimentos de identificação modal e discutidas as principais vantagens e desvantagens de cada um e os principais aspectos que devem ser considerados no processo de escolha destas técnicas.

- *Capítulo 4: Resultados*

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das técnicas de estimação modal para diferentes cenários de simulação, considerando o sistema conectado a um barramento infinito e o sistema conectado a uma barra do SIN. Também são descritos o sistema teste e alguns detalhes dos programas utilizados na etapa de simulação.

- *Capítulo 5: Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros*

São discutidas as conclusões obtidas com essa dissertação e também apresentadas as perspectivas futuras para esse trabalho.

Capítulo 2

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.1. Definição de Geração Distribuída

O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) define geração distribuída como a geração elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores sem a necessidade do transporte de energia através da rede de transmissão. Contudo, esta definição ainda não é um consenso mundial (JENKINS, ALLAN, CROSSLEY, KIRSCHEN, & STRBAC, 2000) e as definições podem variar de acordo com critérios como capacidade instalada, fonte primária, tecnologias empregadas, modo de operação, tipo de despacho, localização da instalação, dentre outros (FERNANDES T. C., 2012), (JENKINS, ALLAN, CROSSLEY, KIRSCHEN, & STRBAC, 2000), (ACKERMANN, ANDERSSON, & SoDER, 2000), e (EL-KHATTAM & SALAMA, 2004).

Nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), a definição de GD é dada no glossário de termos técnicos como “Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas, ou não pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)”.

A definição adotada neste trabalho é similar às fornecidas pelo INEE e pelo PRODIST, isto é, a geração distribuída é aquela produzida utilizando qualquer fonte primária de energia, devendo ser uma geração de pequeno porte que forneça energia elétrica em um ponto próximo ao consumidor, conectada diretamente a sistemas de distribuição.

Apesar da geração distribuída englobar diversas fontes, como hidráulica, solar, eólica ou biomassa, este trabalho tem o foco na geração síncrona distribuída que se refere à geração de eletricidade utilizando um gerador síncrono e que, normalmente, se apresenta no Brasil através de empreendimentos hidrelétricos de menor porte e usinas de co-geração. A maneira como estas fontes se distribuem na matriz de energia elétrica nacional é apresentada no item 1.2, a seguir.

2.2. Matriz de Energia Elétrica e a Geração Distribuída no Contexto Nacional

O Brasil é um país que se diferencia no setor elétrico mundial pois possui sua matriz de energia elétrica com 80% de fontes renováveis. De acordo com Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, o país possui 137.705 MW de potência instalada cujas fontes são Central Geradora Hidrelétrica (CGH); Central Geradora Eólica (EOL); Pequena Central Hidrelétrica (PCH); Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV); Usina Hidrelétrica (UHE); Usina Termelétrica (UTE) e Usina Termonuclear (UTN). A distribuição destas fontes é de acordo com a Tabela 1 e com a Figura 1.

Tipo	Unidades	Potência (MW)	%
CGH	507	342	0,25
EOL	264	6.358	4,62
PCH	476	4.807	3,49
UFV	23	11	0,01
UHE	199	85.073	61,78
UTE	2.679	39.123	28,41
UTN	2	1.990	1,45
Total	4.150	137.705	100

Tabela 1 - Empreendimentos em operação.

Figura 1 - Empreendimentos em operação.

Observa-se que o país possui vasto potencial hídrico, tanto em usinas de grande porte, UHEs, quanto em empreendimentos de menor porte, CGHs e PCHs, que são

considerados GD. Empreendimentos de GD através de usinas de biomassa estão englobados nas UTEs e sua participação na matriz será explicitada no item 1.2.1. deste trabalho. Além disso, o país possui alto potencial para GD através de UFV e EOL, também consideradas fontes alternativas de energia.

A geração de energia elétrica próxima ao local de consumo traz uma série de vantagens para o sistema, tais como diminuição das perdas e do carregamento das redes, economia dos investimentos na transmissão de energia, menor impacto ambiental, além de diversificação da matriz energética e redução de riscos de confiabilidade advindos da importação a longa distância.

Como já foi citado, no país a geração síncrona distribuída se destaca pelas UTEs a biomassa e pelos empreendimentos hidrelétricos de pequeno porte. A utilização destas fontes no país é detalhada nos itens 2.2.1 e 2.2.2, respectivamente.

2.2.1. Usinas Termelétricas a Biomassa

Do ponto de vista energético, a biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado na produção de energia (ANEEL, 2008).

De acordo com o BIG, as termelétricas movidas a biomassa no país somam 508 usinas com potência instalada total de 12.745 MW (ANEEL, 2015) de acordo com a distribuição detalhada da Tabela 2.

O recurso de maior potencial para geração de bioeletricidade no País é o bagaço de cana-de-açúcar devido a importância do setor sucroalcooleiro no país, que gera uma grande quantidade de resíduos sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar. Estes resíduos podem ser aproveitados na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração.

De acordo com os dados da ANEEL de 2015, apresentados na Tabela 2, a capacidade de geração de energia por biomassa corresponde a 8,74% da matriz de energia elétrica do país, sendo que desta capacidade, o bagaço de cana

corresponde a cerca de 79,7%. Segundo estimativas da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2015), em 2020 a eletricidade produzida pelo setor poderá representar 15% da matriz brasileira, com a produção de 14.400 MW médios (ANEEL, 2008).

Tabela 2: A biomassa na matriz de energia elétrica

Fonte		Capacidade Instalada			Total		
Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(MW)	%	Nº de Usinas	(MW)	%
Agroindustriais	Bagaço de Cana	390	10.152,0	6,96	406	10.258,9	7,033
	Biogás-AGR	2	1,7	0,001			
	Capim Elefante	3	65,7	0,045			
	Casca de Arroz	11	39,5	0,027			
Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2	4,4	0,003	2	4,4	0,003
Floresta	Carvão Vegetal	7	51,4	0,035	80	2.408,8	1,651
	Gás de Alto Forno Biomassa	8	109,9	0,075			
	Licor Negro	17	1.885,6	1,293			
	Resíduos de Madeira	48	361,9	0,248			
Resíduos animais	Biogás - RA	9	1,8	0,001	9	1,8	0,001
Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	11	70,9	0,049	11	70,9	0,049
Total:		508	12.745,0	8,74	508	12.745,0	8,74

Também segundo dados da UNICA, em 2013, a oferta de bioeletricidade para o sistema interligado foi de 1.720 MW médios. Esta geração economizou 7% da água nos reservatórios das regiões Sudeste/Centro-Oeste, equivalente ao atendimento de 8 milhões de residências no ano.

Estas usinas, devido a sua localização geográfica, são interligadas às redes elétricas que atendem, principalmente, a grandes centros de consumo dos estados da região Sudeste, uma vez que a produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e também no Nordeste do Brasil de acordo com o mapa da Figura 2 (UNICA, 2015).

Figura 2 - Mapa de produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Estas usinas em questão são normalmente de menor porte e localizadas próximas a centros de consumo. Além disso, o período de safra da cana-de-açúcar coincide com o período seco das principais bacias hidrográficas brasileiras, tornando a opção ainda mais vantajosa. Desta forma, a geração complementar por meio de biomassa auxilia a segurança energética do país.

2.2.2. Aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte

As geradoras de energia elétrica que utilizam o potencial da água como fonte primária possuem três classificações: CGH, PCH e UHE. Destas três, as CGHs e as PCHs são consideradas usinas de porte pequeno, enquanto as UHE são usinas com capacidade de geração acima de 30 MW.

As CGHs correspondem a unidades geradoras de energia com potencial hidráulico igual ou inferior a 1 MW. As PCHs são empreendimentos hidrelétricos com

potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km², de acordo com a Resolução nº 652 de 2003, que estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de pequena central hidrelétrica.

De acordo com o BIG da ANEEL, as CGHs somam 506 usinas com potência instalada total de 340 MW, ou seja, 0,25% da matriz de energia elétrica do país e as PCHs no país somam 474 usinas com potência instalada total de 4.798,55 MW, correspondendo a 3,48% da matriz de energia elétrica do país. A distribuição dessas usinas pode ser vista na Figura 3 de acordo com o Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL).

Figura 3 - Mapa das CGHs e PCHs no Brasil (Fonte: SIGEL).

As hidrelétricas de pequeno porte representam, atualmente, uma forma rápida e eficiente de promover a expansão da oferta de energia elétrica uma vez que o Brasil é um país com vasto potencial hidráulico e essas usinas possuem tempo de execução do projeto menor, além de apresentarem menor impacto ambiental na região em que são implantadas.

2.3. Regulamentação

A GD foi explicitada em documentos normativos do país pela primeira vez em 2004, através da Lei 10.848, publicada em Março e em seguida, pelo Decreto 5.163, publicado em Julho do mesmo ano e que regulamenta a referida lei. Este decreto regulamenta a comercialização de energia elétrica no país e cita a GD como uma fonte de geração comercializável (BACELAR, 2013).

Posteriormente, em 2012, foi publicada a Resolução Normativa nº 482, considerada o marco regulatório no setor. Esta resolução estabelece condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, além de criar um sistema de compensação de energia elétrica, onde a potência ativa injetada na rede pode ser compensada por consumo na mesma unidade consumidora ou em outra de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados (ANEEL, 2012).

Nesta resolução, estão definidos os conceitos:

- i) **microgeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- ii) **minigeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Os critérios de operação dos geradores distribuídos estão normatizados no PRODIST que consiste num conjunto de documentos elaborados pela ANEEL, que normatiza e padroniza as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Estes documentos tem o propósito de garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade (ANEEL, 2015).

No módulo 3 do PRODIST estão estabelecidos os procedimentos para acesso de micro e minigeradores ao sistema de distribuição, assim como os requisitos necessários para garantir a segurança das pessoas e a qualidade da energia injetada na rede.

Diante desta nova configuração do sistema, onde geradores síncronos são instalados na distribuição, novos desafios técnicos se impõem para a operação destes sistemas e as ferramentas de estudos e análises devem ser validadas para fornecer subsídios as procedimentos de operação e aos projetos de melhorias nestes sistemas.

No que se refere ao comportamento dinâmico do sistema, este trabalho apresenta o estudo de identificação dos modos de oscilação eletromecânica a partir de dados ambiente. O capítulo a seguir apresenta o embasamento teórico para os estudos desta natureza.

Capítulo 3

ANÁLISE MODAL

3.1. Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência

Sistemas elétricos de potência são sistemas com comportamento essencialmente dinâmico e continuamente sujeitos a diferentes tipos de distúrbios, grandes ou pequenos, que alteram sua configuração de operação. Dentre estes distúrbios estão as entradas ou saídas de carga, os curto-circuitos e as manobras que alteram a configuração da rede (como saídas ou entradas de linhas de transmissão, transformadores, filtros e bancos de capacitores ou reatores).

Estes eventos levam o sistema de um estado de operação em regime permanente a um comportamento dinâmico para o qual é necessário saber se o sistema é capaz de reagir de maneira satisfatória e dentro de critérios estabelecidos. Ou seja, se é capaz de convergir a um ponto de equilíbrio estável quando ocorrem mudanças estruturais em sua rede elétrica.

Portanto, faz-se necessário o estudo e a análise do comportamento da resposta dinâmica do sistema para o planejamento da operação, operação em tempo real e o planejamento da expansão do sistema.

Para o sistema em nível de transmissão, o planejamento da operação e operação em tempo real são realizados através de estudos para análise dos impactos relativos a possíveis contingências, energização e desenergização de linhas de transmissão para manutenção, impactos em condições de faltas, avaliação de limites de transferência de potência entre áreas e otimização de controladores (ONS, 2011)

Para o planejamento da expansão são realizados estudos para avaliação do impacto da conexão de novos geradores e comparação de alternativas para construção de linhas de transmissão. Estudos específicos de estabilidade também são realizados para análise de grandes ocorrências a fim de determinar suas causas e definir as providências necessárias para evitá-las ou reduzir seus impactos (ONS, 2011).

Já para níveis de distribuição, frente à inserção de cada novo gerador distribuído na rede, devem ser feitos estudos de estabilidade considerando as peculiaridades destes geradores para as perturbações mais comuns a que podem estar sujeitos em níveis de média tensão. Também deseja-se avaliar, através destes estudos, se a conexão do gerador não ocasionará problemas de estabilidade em geradores próximos e na rede em suas proximidades.

Os estudos de estabilidade são realizados através de simulações computacionais, e as ações tomadas a partir destes resultados impactam diretamente tanto a expansão, uma vez que a aprovação para conexão de novos geradores distribuídos depende dos resultados fornecidos por esses estudos, quanto a operação do sistema, que tem sua programação baseada na avaliação de requisitos dinâmicos frente a contingências previamente simuladas.

Além disso, ferramentas de monitoramento dinâmico em tempo real vem sendo utilizadas para o auxílio na tomada de decisão pela operação em tempo real (CHAVES, 2008). Estas ferramentas utilizam as informações do ponto de operação corrente do sistema, obtidas através do sistema de supervisão, e, a partir de uma lista de contingências, estabelecem regiões de segurança dinâmica para a sua operação.

Portanto, os estudos de estabilidade são imprescindíveis em sistemas de potência, que se tornam cada vez mais complexos e com mais peculiaridades, o que justifica o grande desenvolvimento de pesquisas nesta área.

Desta forma, torna-se necessária uma definição formal e suficientemente abrangente de **estabilidade de um sistema dinâmico**. Uma das possíveis definições é dada por (KUNDUR, et al., 2004): *“Estabilidade é a habilidade de um sistema elétrico de potência, para uma dada condição inicial de operação, atingir um*

estado de operação em equilíbrio depois de ser sujeito a alguma perturbação física, com a maioria de suas variáveis limitadas de modo que praticamente todo o sistema permaneça intacto”.

Apesar desta definição formal se aplicar de maneira geral a um sistema de potência, diferentes tipos de instabilidade podem ser observados em diferentes cenários. A alta complexidade de um sistema de potência devido ao grande número de equipamentos conectados e com diferentes escalas de tempo, à grande quantidade de interconexões, às diferentes naturezas de seus elementos (dinâmica e estática), à presença de variáveis contínuas e discretas e o seu comportamento fortemente não-linear fazem com que uma modelagem suficientemente abrangente possa ser tão complexa que inviabilize os estudos dinâmicos para a análise de estabilidade.

Portanto, em cada cenário de interesse, simplificações adequadas ao modelo do sistema podem ser realizadas de maneira a facilitar os diferentes tipos de estudos e análises de estabilidade. Desta forma, o problema de estabilidade em sistemas de potência é classificado em categorias e subcategorias conforme apresentado na Figura 4, (KUNDUR, et al., 2004) e (KUNDUR, 1994).

Figura 4 - Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência

Esta classificação é composta de três categorias: Estabilidade de Ângulo de Rotor; Estabilidade de Frequência; e Estabilidade de Tensão. Tal classificação é feita de acordo com as seguintes considerações:

- A natureza física do processo que resulta em instabilidade;
- O tamanho da perturbação considerada, o que influencia o método de cálculo e previsão de estabilidade; e
- Os dispositivos, os processos envolvidos e o intervalo de tempo que devem ser considerados para avaliar a estabilidade.

A estabilidade de frequência se refere à habilidade de manter uma frequência estável após uma perturbação severa que resulte em um desbalanço significativo entre carga e geração. Está relacionada com a capacidade do sistema de manter o equilíbrio entre a geração e a carga, com o mínimo corte de carga não intencional.

A estabilidade de tensão se refere à habilidade do sistema de manter tensões estáveis em todas as suas barras depois de ter sido submetido a uma perturbação a partir de um determinado ponto de equilíbrio. Está relacionada à capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre demanda e suprimento de carga.

A estabilidade de ângulo de rotor é a capacidade das máquinas síncronas de um sistema de potência de manter o sincronismo depois do mesmo ser submetido a um distúrbio. Tal capacidade é relacionada à possibilidade de manter/restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico de cada máquina do sistema.

A instabilidade de ângulo de rotor pode ocorrer na forma de uma aceleração e/ou desaceleração crescente dos rotores de algumas máquinas, levando a perda do sincronismo das mesmas com outros geradores. Sob condições de regime permanente, há o equilíbrio entre o torque mecânico e o torque eletromagnético de cada gerador e a velocidade permanece constante.

Se o sistema sofre alguma perturbação, ele sai deste equilíbrio resultando na aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas. Se um gerador acelera mais rapidamente do que outro, devido a uma redução da carga inicialmente suprida, há uma alteração na diferença angular entre eles, que resultará em uma

redistribuição da carga de uma máquina a outra de modo a restabelecer este equilíbrio.

Supondo que um gerador sofra uma maior aceleração, sua diferença angular com relação aos demais se tornará maior. Devido ao aumento desta defasagem, há um aumento do suprimento da carga por este gerador (ou seja, há uma transferência da carga dos geradores mais lentos para o mais rápido), que reduzirá sua aceleração e, conseqüentemente, a defasagem angular.

Dentro de certos limites, este comportamento natural do sistema tende a levá-lo de volta ao equilíbrio. A instabilidade ocorre quando este processo não é finalizado satisfatoriamente e o sistema não consegue absorver a energia cinética correspondente a esta diferença de velocidades de rotores.

Usualmente, a estabilidade de ângulo de rotor é classificada em duas subcategorias, de acordo com a natureza de suas perturbações:

Grandes perturbações ou estabilidade transitória: Se refere à habilidade do sistema de manter o sincronismo quando este é sujeito a perturbações severas. Neste caso, deve-se utilizar o modelo não-linear do sistema para a análise do comportamento do mesmo. O intervalo de simulação de interesse é, usualmente, de 3 a 5 segundos, podendo se estender a 20 segundos (KUNDUR, et al., 2004).

Pequenas perturbações: Se refere à habilidade do sistema de manter o sincronismo quando este é sujeito a pequenas perturbações. Neste caso, considera-se o modelo linear do sistema. O intervalo de simulação de interesse é, usualmente, de 10 a 20 segundos (KUNDUR, et al., 2004).

Este projeto de mestrado tem por objetivo a identificação de modos de oscilações eletromecânicas de um sistema com a presença de geradores síncronos distribuídos. Portanto, este trabalho insere-se na categoria de estabilidade de ângulo de rotor e na subcategoria estabilidade de ângulo de rotor a pequenas perturbações.

Modo de oscilação eletromecânica é o termo para um padrão específico de oscilação (ROGERS, 2000) e este conceito será discutido com mais detalhes no item 3.3.1. Sendo assim, esta relação direta entre os modos eletromecânicos e a

estabilidade de ângulo de rotor sob pequenas perturbações poderá ser melhor compreendida no decorrer deste capítulo.

3.2. Estabilidade de Ângulo de Rotor sob Pequenas Perturbações

Este tipo de estudo de estabilidade é dependente do ponto inicial de operação do sistema e é feito quando a perturbação é pequena o suficiente para que a linearização do sistema em torno do ponto de operação proporcione um modelo fidedigno ao seu comportamento real.

Este conceito de estabilidade consiste na habilidade do sistema em manter sincronismo quando sujeito a pequenas perturbações, e a instabilidade pode ocorrer de duas formas: pelo aumento do ângulo de rotor de forma aperiódica, devido a perda do torque sincronizante; ou pelo aumento da amplitude de oscilação, devido a perda do torque de amortecimento. Os comportamentos associados a cada uma destas naturezas estão apresentados na Figura 5, pelos itens (a) e (b), respectivamente.

Figura 5 - Tipos de instabilidade de ângulo de rotor sob pequenas perturbações.

Os modos de oscilação eletromecânica, foco deste trabalho, fornecem informações do desempenho do sistema com comportamento oscilatório estável, sendo uma delas o amortecimento da oscilação. O modelo linearizado que permite a análise destas características é apresentado no item 3.3.

3.3. Análise Linearizada

Para estudos dinâmicos, um SEP pode ser modelado através de um conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares. A análise do comportamento do sistema através deste modelo não-linear pode apresentar grande complexidade pois, frequentemente, não é possível encontrar uma solução analítica em termos de funções elementares para o problema, de forma que outros métodos de solução devam ser utilizados.

Contudo, quando este sistema é sujeito a uma pequena perturbação a partir de um ponto de operação em regime permanente, isto é, a partir de um ponto de equilíbrio, este modelo originalmente não-linear pode ser linearizado em torno do ponto de equilíbrio e a análise a partir deste novo modelo se torna mais simples. Esta aproximação é válida desde que a trajetória percorrida pelo sistema no espaço de estados, provocada pela pequena perturbação, permaneça nas imediações do ponto de equilíbrio.

Assim, com o modelo linear, podemos utilizar técnicas de análise modal e obter informações sobre a estabilidade do sistema. O modelo linearizado é utilizado para o projeto, otimização e ajuste de controladores do sistema, além de permitir a identificação da natureza das oscilações crescentes ou pouco amortecidas. Desta forma, é possível utilizar a análise linear para o projeto ou ajustes dos controladores para o amortecimento das oscilações, conhecidos como *Power System Stabilizer* (PSS).

O sistema não-linear com $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ é modelado da seguinte forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (3.1)$$

sendo $\mathbf{x}$ o vetor de estados e $\mathbf{u}$ o vetor de entrada que consiste nos sinais externos que influenciam a performance do sistema. Este sistema é dito autônomo, uma vez que as derivadas dos estados do sistema não são funções explícitas do tempo. Como é de interesse observar o comportamento de determinados sinais de saída, esta é escrita em termos das variáveis de estado, $\mathbf{x}$, e das variáveis de entrada, $\mathbf{u}$ conforme equação (3.2), onde $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$.

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (3.2)$$

Sendo este o sistema não-linear original e assumindo que o mesmo sofre uma pequena perturbação, o processo de linearização (KUNDUR, 1994) é realizado através da expansão do modelo em série de Taylor em torno do ponto de equilíbrio para o qual $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$. Seja $\mathbf{x}_e$ o estado de equilíbrio e $\mathbf{u}_e$ o vetor de entrada correspondente ao ponto de equilíbrio que satisfaçam a equação (3.3).

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{f}(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_e) = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

O sistema é então, a partir do ponto de equilíbrio, sujeito a uma pequena perturbação em que

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_e + \Delta\mathbf{x} \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_e + \Delta\mathbf{u} \quad (3.4)$$

onde $\Delta\mathbf{x}$ e $\Delta\mathbf{u}$ denotam o pequeno desvio sofrido pelo sistema.

A equação (3.1) é reescrita como

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_e + \Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_e + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{u}_e + \Delta\mathbf{u}) \quad (3.5)$$

Esta equação pode ser expressa em função da expansão em série de Taylor onde são desprezados os termos a partir de segunda ordem. O resultado da expansão para cada elemento f_i de $\mathbf{f}$ com $i = 1, 2, \dots, n$ é dado na equação (3.6).

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{e_i} + \Delta\dot{x}_i = f_i(\mathbf{x}_e + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{u}_e + \Delta\mathbf{u}) \\ &\approx f_i(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_e) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 \dots \\ &\quad + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned} \quad (3.6)$$

Como $x_{e_i} = f_i(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_e)$,

$$\Delta\dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3.7)$$

Analogamente para a saída com $j = 1, 2, \dots, m$

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3.8)$$

Assim, as equações do sistema linearizado equivalente são escritas como:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u}\end{aligned}\quad (3.9)$$

onde

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.10)$$

Tais matrizes são definidas como:

- **A** - matriz de estados com dimensão $n \times n$;
- **B** - matriz de entrada de controle com dimensão $n \times r$
- **C** - matriz de saída com dimensão $m \times n$;
- **D** - matriz de transmissão direta com dimensão $m \times r$

Este modelo da equação (3.10) é o modelo linear equivalente ao sistema não-linear original. A vantagem da utilização deste modelo linearizado é de que ele possui propriedades locais equivalentes às do sistema não-linear em torno do ponto de equilíbrio.

Uma vez que o modelo linear possui resposta analítica definida, a avaliação da estabilidade do sistema é obtida através dos autovalores da matriz **A** (KUNDUR, 1994). Esta matriz representa o comportamento do sistema quando ele é excitado por uma determinada condição inicial para entrada nula. É ela quem define a transição dos estados sob esta condição (KUO, 1995).

Assim, é possível afirmar que, se todos os autovalores da matriz **A** possuem parte real negativa, o sistema linear é uniformemente assintoticamente estável e, conseqüentemente, o sistema não-linear também apresenta estabilidade local. Uma

maior compreensão desta afirmação pode ser obtida através do *Apêndice I* que trata da resposta no tempo de um sistema linear.

3.3.1. Os modos de Oscilação Eletromecânica

Alguns dos autovalores da matriz A são complexos e aparecem em pares de pólos complexos conjugados (conforme apresentado no *Apêndice I* e fornecido pela equação (3.11)).

$$\lambda_k = \sigma_k \pm j\omega_k \quad (3.11)$$

Cada par de autovalores complexos está associado a um modo de oscilação do sistema, que são padrões de oscilação que fornecem a informação de frequência e amortecimento, os quais, por sua vez, são indicativos importantes do estresse do sistema, normalmente apresentando pior desempenho com o aumento da carga ou com a redução da capacidade da rede (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008).

Estes autovalores de interesse são classificados principalmente em modos locais e modos interárea, existindo também os modos intraplanta e torcionais que são menos comuns (KUNDUR, 1994).

Neste trabalho, as oscilações observadas estão associadas a interações dinâmicas entre as partes mecânicas e elétricas de seus respectivos geradores (em sua maioria síncronos) e, por esta razão, tais autovalores são usualmente conhecidos como modos eletromecânicos (ROGERS, 2000).

As frequências naturais das oscilações eletromecânicas para tais modos locais ou inter-área situam-se na faixa de 0,5 a 10 Hz (FERNANDES, 2012). Pode-se defini-los da seguinte forma:

Modos locais que representam as oscilações que ocorrem entre uma máquina equivalente (de uma usina, por exemplo) e o restante do sistema. O termo local é utilizado pois é localizado em uma parte reduzida do sistema.

Modos interárea que representam um determinado grupo de geradores de uma parte do sistema oscilando coerentemente contra outro grupo de geradores em outra parte.

Os modos eletromecânicos são compostos por uma frequência de oscilação e um fator de amortecimento. A importância da identificação destes modos se deve ao fato de problemas de estabilidade de ângulo do rotor serem comumente associadas com baixo fator de amortecimento da oscilação.

A mera inexistência de polos no semi-plano direito do plano complexo não significa que a resposta dinâmica do sistema será aceitável do ponto de vista prático. Mesmo neste caso, podem ainda existir polos com parte real negativa muito pequena, resultando em um sistema próximo da condição marginalmente estável, cuja resposta exibirá oscilações que poderão perdurar por um tempo excessivo (FERNANDES, 2012).

Os controladores de amortecimento, PSSs, do sistema devem não apenas amortecer esta oscilação, como também realizar este amortecimento dentro de determinadas faixas de segurança de modo a garantir que variações intoleráveis não comprometam a operação do sistema (GOMES, MARTINS, & PORTELA, 2003). Desta forma, define-se um fator de amortecimento normalmente utilizado para estabelecer limites seguros de amortecimento no sistema, de modo que sua estabilidade não fique comprometida.

A frequência de oscilação em Hz é dada por:

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} \quad (3.12)$$

O fator de amortecimento, ζ é definido por:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (3.13)$$

A partir da equação (3.13), define-se um fator de amortecimento mínimo $\zeta_{\min}$, de forma que todos os autovalores da matriz A estejam posicionados dentro da região à esquerda das linhas pontilhadas mostradas na Figura 6, garantindo uma margem de estabilidade satisfatória.

Usualmente, em sistemas de potência, define-se o valor de 0,05 (ou 5%) como sendo o mínimo amortecimento aceitável para todos os modos de oscilação do sistema (SASTRY, 1999), pois a prática revelou que tal critério implica normalmente que as oscilações extinguem-se em tempo satisfatório, não sendo prejudiciais para o sistema.

Figura 6 - Lugar geométrico dos polos da matriz A considerado como indicador satisfatório de margem de estabilidade a pequenas perturbações

Assim, através da construção do modelo linear do sistema e do cálculo dos autovalores da matriz de estados A , obtém-se conclusões e análises da estabilidade do sistema.

Contudo, a obtenção dos modos eletromecânicos através do método de linearização exige o modelo completo e detalhado do sistema. Portanto, deve-se conhecer todos os modelos e parâmetros dos componentes, assim como a configuração da rede no instante do estudo. Isso nem sempre é fácil, uma vez que o sistema é de grande dimensão, grande complexidade e constantemente sujeito a alterações de configuração e parâmetros.

Manter essa base de dados sempre atualizada é uma árdua tarefa e também se torna uma desvantagem na utilização deste procedimento. Uma alternativa para a identificação modal seria, portanto, a identificação baseada em medidas, e não no modelo do sistema. Tal abordagem é apresentada no item 3.4.

3.4. Identificação Modal

Para os estudos de pequenas perturbações estabelecem-se duas diferentes abordagens: na primeira, conforme já foi apresentado no processo de análise linearizada, é utilizado o modelo do sistema com o conhecimento dos parâmetros, a modelagem dos componentes e as configurações da rede. Desta forma, os modos eletromecânicos são identificados através do cálculo dos autovalores da matriz de estados característica do modelo linearizado (KUNDUR, et al., 2004).

Na segunda abordagem, conhecida como **estimação modal**, não são utilizados os parâmetros, sendo necessários apenas sinais amostrados através de um medidor. Neste caso, é ajustada uma curva a estes pontos amostrados, assumindo que a resposta do sistema é linear. Assim, através do processamento deste sinal, os modos eletromecânicos são identificados (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).

As aplicações de métodos de estimação modal tiveram um grande impulso com o surgimento das unidades de medição fasorial sincronizada. Estas unidades permitiram a amostragem da resposta temporal de elementos de um sistema de potência em pontos distintos (possivelmente separados por uma grande distância geográfica) de forma sincronizada (PHADKE, 2002). A partir desta tecnologia é possível então armazenar os dados destas respostas e utilizá-los num pós-processamento para a extração de características importantes para a análise do sistema (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).

Os métodos para estimação modal podem ser métodos não-paramétricos e métodos paramétricos (JEREMIAS, 2012). A estimação não-paramétrica não faz qualquer hipótese sobre o modelo que representa o sistema em estudo, portanto, não fornece um modelo analítico, mas sim extrai um conjunto de informações de interesse sobre seu comportamento, como a análise de correlação do sinal, análise de frequência e análise espectral.

Estas técnicas podem se basear em decomposição espectral, quando buscam a determinação do espectro densidade de potência, utilizando-se de métodos numéricos para esta estimação normalmente baseados no uso da Transformada Discreta de Fourier (TDF), (ou DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*), ou na correlação, quando utilizam-se de funções de correlação para obtenção de

informações sobre o conteúdo de frequências de um sinal (JEREMIAS, 2012). A principal desvantagem destes métodos é que, apesar de fornecerem uma boa estimação das frequências das componentes que formam o sinal, não permitem calcular o amortecimento destas componentes.

Já na estimação paramétrica, assume-se que o sinal de saída satisfaz um modelo cujas funções são conhecidas e, a partir disso, são calculados seus parâmetros. Neste caso, os modos são obtidos a partir de um conhecimento prévio do modelo do sistema elétrico de potência e as técnicas são aplicadas no domínio do tempo. Os métodos paramétricos podem ser métodos baseados na representação de sinais por exponenciais (HAUER J. F., 1991), (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990), (TRUDNOWSKI, JOHNSON, & HAUER, 1999), métodos baseados na equação de Yule-Walker (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008), (ANDERSON, ZHOU, PIERRE, & WIES, 2005), (WIES, PIERRE, & TRUDNOWSKI, 2003) e (ZHOU, PIERRE, & WIES, 2003) e métodos de subespaços de estados (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009), (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008), (OVERSCHEE & DE MOOR, 1994).

Os métodos de reconstrução do sinal são aplicados, por exemplo, em sistemas de potência em situações em que estes estão sujeitos a uma perturbação que estimule significativamente suas dinâmicas. Assim, os parâmetros de um modelo cuja estrutura é previamente conhecida são estimados utilizando a porção transitória do sinal de resposta a esta perturbação.

Para o caso de sistemas de potência sujeitos a pequenas perturbações, assume-se que a resposta do sistema será linear e dada por uma somatória de cossenóides amortecidas no tempo.

Os métodos baseados em subespaços de estados assumem um modelo conforme apresentado na equação (3.30). O objetivo dessas técnicas é a determinação direta das matrizes A , B , C e D (equação (3.9)) para o posterior cálculo dos autovalores da matriz A , que determinarão os modos de oscilação.

Os modos eletromecânicos podem ser monitorados tanto através de dados ambientes, que são a resposta do sistema sujeito continuamente a variações

ambientes de baixa amplitude, quanto por dados transientes, ou *ringdown*, que correspondem à resposta transitória do sistema quando sujeito uma perturbação que o afasta do seu ponto de equilíbrio. Para cada condição existem técnicas de melhor desempenho e deve-se atentar para as principais características de cada uma. A Figura 7 apresenta exemplos de sinais que podem ser utilizados para a identificação modal.

Figura 7 - Exemplos de transitórios utilizados na identificação modal adaptado de (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).

Para exemplificar este fato, é apresentada em (JEREMIAS, 2012) uma situação que demonstra as aplicabilidades de diferentes técnicas.

Dado um sistema dinâmico amortecido, este é sujeito a uma perturbação e sua resposta é conforme a Figura 8 (a). Neste caso, como se sabe que a resposta transiente é uma soma de cossenóides amortecidas, os parâmetros de oscilação, como frequência e amortecimento do sistema, podem ser obtidos por alguma técnica de reconstrução do sinal da categoria métodos paramétricos.

Quando o mesmo sistema é sujeito a uma entrada contínua, semelhante ao caso de ruídos de entrada, a resposta do sistema é conforme a Figura 8 (b). Neste caso, se for aplicada alguma técnica de reconstrução do sinal, pode-se ter a

impressão de que o sistema não é amortecido, ou até mesmo que possua amortecimento negativo.

Figura 8 - Diferentes respostas de um mesmo sistema dinâmico.

Contudo, na verdade, o sistema possui o mesmo amortecimento do primeiro caso, já que o amortecimento se trata de característica intrínseca ao sistema e não dependente da perturbação. Para o segundo caso, pode-se utilizar alguma técnica paramétrica baseada em modelo de subespaço de estados, já que as características de ruído de entrada estão consideradas no processo de estimação dos modos. Também, neste caso, é possível utilizar técnicas não-paramétricas, tanto por decomposição espectral quanto por correlação, ficando a escolha mais adequada em função de outros aspectos como simplicidade de aplicação, tempo de processamento e resolução de frequência ou amortecimento, por exemplo.

Por outro lado, as técnicas que utilizam funções de correlação do sinal ou as de identificação do modelo em subespaço de estados não podem ser aplicadas a dados de *ringdown*, pois necessitam de amostras extensas no tempo para correta obtenção do resultado, enquanto os eventos transientes são de curta duração. Assim, estas técnicas se adequam somente a dados ambientes (JEREMIAS, 2012).

Sabendo que a aplicabilidade de cada método depende do contexto ao qual o sistema de potência está inserido, deve-se avaliar bem as características do sinal a ser coletado para então definir qual técnica se adequa melhor para identificação dos modos eletromecânicos.

Desta forma, definem-se duas categorias para as técnicas de estimação modal, com relação ao tipo de dados coletados: a primeira delas é a de ***ringdown algorithms***, que utiliza-se da resposta transitória do sistema quando perturbações arbitrárias e relativamente significativas (mas ainda classificadas como pequenas perturbações) são aplicadas e posteriormente retiradas do sistema, de forma que o mesmo retorne a uma posição de equilíbrio. Neste caso, a perturbação aplicada possui a função de estimular os modos do sistema que podem, então, ser identificados.

A outra categoria é a de ***mode-meter algorithms***, que são técnicas apropriadas a sinais com dados ambiente, nas quais assume-se que os modos do sistema são excitados continuamente pelos eventos classificados como aleatórios, tais como variações de cargas que ocorrem natural e intermitentemente no sistema. A principal vantagem desta categoria é que, dado que o emprego dessas técnicas não requer a ocorrência ou aplicação de uma perturbação arbitrária ao sistema, a própria resposta deste aos estímulos aleatórios naturais possibilita a estimação dos modos eletromecânicos sobre qualquer porção do sinal de saída. Portanto, essa aplicação é menos invasiva ao sistema.

Contudo, por se utilizar de dados de pequena amplitude e com menor energia contida nos estímulos, este método apresenta menor observabilidade dos modos. Desta forma, deve-se avaliar criteriosamente as técnicas que melhor se adequam à identificação dos modos para estes tipos de sinais.

Figura 9 – Abordagens para identificação dos modos eletromecânicos.

O foco deste trabalho é a estimação modal a partir de dados ambiente, utilizando um método paramétrico de identificação de subespaço de estados. Logo, o trabalho se insere na categoria de *mode-meter algorithms* para a análise de estabilidade de ângulo de rotor à pequenas perturbações, conforme destacado na Figura 5. Ademais, também serão gerados resultados para comparação utilizando um método paramétrico de reconstrução de sinais da categoria *ringdown*.

Ambas as abordagens, assim como as descrições das técnicas que serão utilizadas, são apresentadas nos itens 3.5 e 3.6

3.5. Estimação com Distúrbios - Métodos de *Ringdown Analysis*

Como já foi apresentado, as técnicas que se enquadram nesta categoria utilizam-se da resposta transitória quando perturbações arbitrárias e relativamente significativas são aplicadas e posteriormente retiradas do sistema, de forma que o mesmo retorne a uma posição de equilíbrio. Tais perturbações estimulam os modos do sistema que podem, então, ser identificados.

Dentre estas técnicas, destacam-se os métodos de Prony (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990) e ESPRIT (BOLLEN & GU, 2006), sendo o Prony o método mais amplamente estudado nesta categoria. Este método foi abordado pela primeira vez para SEPs em 1990 por (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990).

A partir de dados amostrais no tempo, estes métodos permitem a decomposição da resposta em uma soma de cossenóides amortecidas através do ajuste de modelos lineares de resposta aos dados obtidos (HAUER, TRUDNOWSKI, & DESTEESE, 2007). Para isso, parte-se do pressuposto de que dinâmicas lineares dominam tal resposta, ou seja, o sistema está sujeito a uma perturbação suficientemente pequena para que este pressuposto seja verdadeiro. Estas cossenóides amortecidas são do tipo (HAUER, TRUDNOWSKI, & DESTEESE, 2007):

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^n A_k e^{\sigma_k t} \cos(\omega_k + \theta_k) \quad (3.14)$$

sendo que k é a k -ésima exponencial complexa que compõe o modelo, A_k a amplitude, σ_k a taxa de decaimento, ω_k a frequência angular, θ_k a defasagem da respectiva cossenóide k e n corresponde ao número total de exponenciais que compõe o modelo, ou seja, a sua ordem.

Este processo faz com que a frequência, o amortecimento, a fase e a amplitude da oscilação sejam obtidas de maneira direta. Neste trabalho foi utilizado o método de Prony para a validação dos resultados, implementado no programa MATLAB (MATH WORKS, 1991), dando continuidade a outros estudos realizados em trabalhos do grupo de pesquisa (SALIM, 2011), (FERNANDES, 2012), (GERALDI JUNIOR, 2012).

3.5.1. Método de Prony

O método de Prony consiste em uma técnica que estima o modelo formado por uma combinação linear de exponenciais complexas utilizando os dados amostrados. É uma técnica desenvolvida em 1975 por Gaspard Riche, o Barão de Prony, que demonstrou que as leis que governam a expansão dos gases pode ser representada por uma soma de senóides amortecidas (MARPLE, 1987).

A utilização desta técnicas em SEPs teve seu início no começo da década de 90 por (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990) e até hoje é vastamente utilizada em SEPs para a identificação de modos eletromecânicos para a análise de estabilidade do sistema a pequenas perturbações (JOHNSON, ZARAFONITIS, & CALLIGARIS, 2000), (HAUER J. F., 1991), (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990), (TRUDNOWSKI, SMITH, SHORT, & PIERRE, 1991), (ZHAO, GAO, HU, YANG, ZHAN, & ZHANG, 2009), (SALIM, 2011) e (FERNANDES, 2012).

Para a formulação do problema, considere um dado sinal amostrado, $y(k)$, com período de amostragem T fixo, que pode ser representado por um modelo composto por uma soma de exponenciais ponderadas através do método de Prony. Tal modelo é formado por polos e resíduos que, conjuntamente, constituem a composição modal do sinal (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990).

Considerando um sistema linear invariante no tempo, conforme a equação (3.15), onde as entradas de controle são nulas e o sistema é sujeito a uma condição inicial x_0 .

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (3.15)$$

A solução deste sistema é descrita pela equação (3.16), conforme apresentado no *Apêndice I*.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n (\psi_i^T x_0) \varphi_i e^{\lambda_i t} \quad (3.16)$$

em que λ_i é o autovalor; φ_i é o autovetor à direita, ψ_i^T é autovetor à esquerda e n é a ordem, todos associados à matriz A . A parcela correspondente a $(\psi_i^T x_0)$ determina o estímulo associado ao modo λ_i , enquanto o autovetor à direita, φ_i irá determinar a distribuição modal entre os componentes de x (HAUER, DEMEURE, & SCHARF, 1990) .

A equação (3.16) pode ser reescrita em termos da matriz R_i de resíduos do sistema, conforme a equação (3.17):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad (3.17)$$

A saída do sistema, é dada pela equação (3.18):

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.18)$$

que pode ser reescrita na equação (3.19), em termos da matriz de resíduos, R_i :

$$y(t) = C \sum_{i=1}^n R_i x_0 e^{\lambda_i t} \quad (3.19)$$

Através da aplicação do método de Prony, é possível estimar diretamente os parâmetros dos termos exponenciais da equação (3.19), por meio de um ajuste de uma soma de cossenoides amortecidas ao sinal discreto de saída, $y(k)$.

Assim, considerando a estimativa do sinal, $\hat{y}(k)$, representada por N amostras $\hat{y}(1), \dots, \hat{y}(N)$. O método de Prony irá estimar $\hat{y}(k)$ a partir de um modelo formado por uma soma de n exponenciais complexas (MARPLE, 1987) conforme a equação (3.20):

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\sigma_i k T} \cdot \cos(2\pi f_i k T + \theta_i) \quad (3.20)$$

para $1 \leq k \leq N$.

Na equação (3.20) tem-se:

- i : índice referido a i -ésima exponencial complexa que compõe o modelo;
- n : número total de exponenciais que compõe o modelo, ou seja, a ordem do modelo que deseja-se estimar;
- A_i : amplitude da exponencial complexa;
- f_i : frequência (em Hz);
- σ_i : taxa de decaimento;
- θ_i : fases iniciais (em rad).

Sendo $y(k)$ o sinal amostrado no tempo discreto e $\hat{y}(k)$ o sinal estimado que será obtido por meio do modelo, a equação (3.20) é reescrita, baseada na equação (3.19) discretizada, como:

$$\hat{y}(k) = C \sum_{i=1}^n R_i z_i^k = \sum_{i=1}^n B_i z_i^k \quad (3.21)$$

onde $z_i = e^{\lambda_i T} = e^{[(\alpha_i + j2\pi f_i)T]}$ e $B_i = A_i e^{j\theta_i}$.

Portanto, o objetivo do método é calcular os parâmetros que representam o sistema, ou seja, a matriz B_i e os pólos discretos z_i , que permitam que $\hat{y}(k)$ seja igual a $y(k)$ para todas as amostras que compõem o sinal de interesse.

A equação (3.21) pode ser reescrita matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(0) \\ \hat{y}(1) \\ \vdots \\ \hat{y}(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Primeiramente deve-se construir e resolver o Modelo de Predição Linear Discreta (MPLD) a partir das amostras de saída (MARPLE, 1987). Este modelo é formado pela equação (3.23).

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \cdots + a_n y(k-n) \quad (3.23)$$

Os parâmetros a_i da equação (3.23), compõe um modelo de predição linear que ajusta as amostras do sinal recursivamente. Dessa forma, uma amostra $y(k)$ do sinal pode ser descrita como uma combinação linear das n amostras anteriores, $x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-n)$.

A equação (3.23) é utilizada para composição do sistema matricial da equação (3.24):

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \cdots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \cdots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Vale destacar que foram utilizadas N amostras do sinal. Nesse caso, a quantidade de igualdades na equação (3.10) é maior do que a quantidade de incógnitas, a_i , o que faz com o sistema seja sobredeterminado.

Sendo as amostras do sinal conhecidas, solucionando a equação (3.24) é possível obter os coeficientes a_i . Com os coeficientes a_i obtidos, forma-se o polinômio característico do problema preditivo linear que é dado pela equação (3.25)

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \cdots + a_n z^0) = 0 \quad (3.25)$$

cujas raízes são os pólos do sistema linear no domínio discreto.

De posse das raízes da equação característica, a taxa de decaimento σ_i e a frequência f_i , presentes na equação (3.20), podem ser calculadas por (MARPLE, 1987):

$$\sigma_i = \frac{\ln|z_i|}{T} \quad (3.26)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi T} \arctg \left[\frac{\text{Im}\{z_i\}}{\text{Re}\{z_i\}} \right] \quad (3.27)$$

Prosseguindo com a solução do problema, com os pólos discretos calculados, pode-se resolver o conjunto de equações lineares da equação (3.22), obtendo assim os parâmetros B_i .

Por fim, com os valores de B_i , é possível adquirir as amplitudes A_i e as fases iniciais θ_i através das equações (MARPLE, 1987):

$$A_i = |B_i| \quad (3.28)$$

$$\theta_i = \arctg \left[\frac{\text{Im}\{B_i\}}{\text{Re}\{B_i\}} \right] \quad (3.29)$$

Assim, observa-se que a aplicação do método de Prony pode ser resumida, de forma geral, em três passos (HAUER, DEMEURE, SCHARF, 1990):

- i. Construir um MPLD que se ajuste ao sinal;
- ii. Encontrar as raízes do polinômio característico associado ao MPLD desenvolvido no passo anterior;
- iii. Usando as raízes calculadas no passo ii, determinar a amplitude, a fase inicial, a frequência e a taxa de decaimento de cada modo.

O método de Prony é adequado e fornece bons resultados para períodos do sinal com perturbações e resposta transiente. Além disso pode ser aplicado a várias saídas simultaneamente através do método de Prony multisinais, tornando o método mais preciso (TRUDNOWSKI, D.; JOHNSON, J.; HAUER, J., 1999).

Por outro lado, ainda persiste a desvantagem, inerente aos métodos de *ringdown*, da necessidade de aplicação de uma perturbação ao sistema. Nesse sentido, tais métodos podem ser considerados invasivos, característica que não é desejável para a operação do sistema.

Obviamente, pode-se aguardar a ocorrência de uma perturbação significativa no mesmo e trabalhar-se com os registros de perturbação *a posteriori* para realizar as análises correspondentes. Nesse caso, no entanto, a informação desejada só estaria disponível após a coleta do registro de tal perturbação, e em certos casos pode ser necessário o conhecimento tal informação *a priori*, até mesmo para definir ações de controle visando manter a estabilidade do sistema na ocorrência de tais perturbações.

Como os métodos de *ringdown* realizam o ajuste dos dados a um modelo linear, deve-se tomar a resposta do sistema a partir do instante em que seu comportamento seja predominantemente linear, excluindo-se do sinal amostrado o período imediatamente posterior à ocorrência da perturbação que estimulou a resposta dinâmica do sistema, no qual podem ocorrer comportamentos oriundos das dinâmicas não-lineares.

O empirismo inerente a essa seleção da porção do sinal pode interferir com a precisão e com a uniformidade dos resultados do processo de estimação, pois escolhas distintas do instante mencionado podem levar a resultados diferentes com o mesmo conjunto completo de dados amostrados.

A ordem do modelo é um parâmetro a ser definido pelo analista e deve ser levado em conta o número de amostras do sinal. Esta ordem deve ser grande o suficiente para que represente as componentes do sinal, mas deve-se ter em mente que ordens elevadas aumentam o esforço computacional.

Por fim, o método de Prony possui a desvantagem de ter seu desempenho afetado pela presença de ruídos no sinal utilizado (GERALDI JUNIOR, 2012).

Este trabalho tem a intenção de avaliar esta influência, considerando diferentes amplitudes de ruído de entrada que produzirão a resposta do sistema caracterizada

como de dados ambiente. Cabe ressaltar que, em sistemas de distribuição, a amplitude destas variações é mais significativa quando em comparação aos sistemas de transmissão, sendo que este fato deve ser levado em conta para a análises mais precisas em sistemas de distribuição.

Estes resultados serão utilizados como base para a avaliação do desempenho do método de dados ambiente que será utilizado neste trabalho.

3.6. Estimação com Dados Ambiente - *Mode-Meter Algorithms*

Para contornar as desvantagens citadas no método de estimação *ringdown* para obtenção dos modos de oscilação, é apresentado o conceito para os métodos de estimação *mode meter*, que consistem na identificação modal realizada a partir de dados com ruído ambiente. “*Mode-meter*” se refere a qualquer ferramenta automática que realiza a identificação dos modos eletromecânicos continuamente, sem a necessidade de qualquer entrada exógena ao sistema (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008).

Em linhas gerais, na categoria de *mode-meter*, o ruído de entrada referente às pequenas variações de carga é assumido como a própria fonte de estímulo para o aparecimento das oscilações eletromecânicas, o que permite a identificação das mesmas. Em contraste com os algoritmos de *ringdown*, os métodos de *mode-meter* são minimamente invasivos, pois valem-se das perturbações de pequena monta que ocorrem natural e frequentemente nos sistemas de potência para a realização da identificação modal, podendo ser aplicados a qualquer porção do sinal de saída.

Além disso, o método não exige o conhecimento detalhado do modelo e de todos os parâmetros do sistema. Esta é uma vantagem sobre os métodos baseados em linearização, uma vez que há uma grande incerteza ou mesmo desconhecimento sobre estes parâmetros. Esta incerteza é ainda mais significativa em nível de distribuição, onde até mesmo os componentes de menor porte necessitam ser modelados para uma adequada representação do sistema.

Este item apresenta a formulação de um sistema dinâmico sujeito a pequenas perturbações, considerando as condições de ruído de entrada (ou ruído inerente ao sistema), que são as variações de pequena magnitude às quais o sistema é sujeito constantemente em sua operação, e a descrição sucinta da formulação desta categoria que será vista adiante.

3.6.1. Formulação do problema sob condições de dados ambiente

Conforme apresentado no item 3.3, para a análise de um sistema diferencial-algébrico não-linear quando sujeito a uma pequena perturbação, pode-se assumir um modelo equivalente obtido através da linearização do sistema em um ponto de equilíbrio.

Este novo modelo diferencial linear em espaço de estados deve conter os componentes necessários para a representação fiel ao comportamento real do sistema em condições de operação que estão sujeitas a ruídos de entrada, ocasionados por variações de carga, e ruídos de medição do sinal de saída. Desta forma, este modelo pode ser escrito por (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008):

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_E \mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_L \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_E \mathbf{u}(t) + \mathbf{D}_L \mathbf{v}(t) + \mu(t)\end{aligned}\tag{3.30}$$

em que $\mathbf{x}$ é o vetor de estados, $\mathbf{u}$ é o vetor de entradas injetadas no sistema e $\mathbf{v}$ o vetor de entradas aleatórias que perturbam o sistema, referentes às variações de carga. O sinal $\mu(t)$ que compõe a saída $\mathbf{y}$ se refere ao ruído de medição, normalmente de baixa amplitude quando os instrumentos de medida são de boa qualidade. As matrizes do sistema em (3.30) são equivalentes às citadas em (3.10). Contudo, neste caso, as matrizes $\mathbf{B}$ e $\mathbf{D}$ são divididas em uma parte associada à entrada $\mathbf{u}$ e outra associada à entrada $\mathbf{v}$.

Para este modelo podem ser admitidas as abordagens determinística, estocástica ou completa. Na abordagem determinística não são considerados os ruídos de entrada e saída, portanto, $\mathbf{v}$ e μ são iguais a zero. Também assume-se que a entrada $\mathbf{u}$ é conhecida, uma vez que se trata de sinais externos injetados ao

sistema (como sinais de prova, por exemplo). Na abordagem estocástica, são considerados os ruídos de entrada e saída, mas a entrada externa ao sistema u é considerada nula, sendo o sistema apenas sujeito a condições ambientes em sua operação. Já na modelagem completa, todos os termos do modelo são considerados, ou seja, o sistema é tanto sujeito a ruídos de entrada e sinais externos que estimulam sua dinâmica, quanto a sinais de ruídos na saída referentes à medição (JEREMIAS, 2012). Para cada uma destas considerações no modelo existem técnicas de processamento de sinais que se aplicam de maneira mais adequada para identificação modal.

Os algoritmos de estimação modal do tipo *mode-meter* se dividem em dois tipos com relação ao processamento da amostra de dados. São estes: **processamento de blocos de dados** ou **recursivos** (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).

Nos algoritmos que utilizam blocos de dados, os modos são estimados através de uma janela de dados. Para cada nova janela de dados é realizada uma nova estimação dos modos, de forma que todos os modos de um conjunto de janelas são igualmente ponderados. Entretanto, cada estimação requer o mesmo tempo da janela para ser realizada.

Nos algoritmos recursivos, os modos estimados são atualizados a cada nova amostra de dados. Uma nova estimativa é obtida a partir da combinação da nova amostra com aquelas obtidas na estimação anterior. Neste caso, um fator de esquecimento é utilizado e, consequentemente, a nova estimativa possui um peso maior perante as anteriores. Assim como os algoritmos de blocos de dados, os algoritmos recursivos necessitam de muitos minutos de dados para convergir a um resultado (TRUDNOWSKI & PIERRE, 2009).

O método da categoria *mode-meter* escolhido para este trabalho foi o *Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID), um método paramétrico que utiliza modelo de subespaço de estados e processamento por blocos de dados. Ele foi escolhido devido sua vasta utilização em sistemas de potência, até então em níveis de transmissão, e pelos bons resultados que tem apresentado nestes estudos (TRUDNOWSKI D. J., PIERRE, ZHOU, HAUER, & PARASHAR, 2008), (JEREMIAS, 2012), (PRIOSTE, 2011) e (DE MARCO, 2013).

O objetivo deste trabalho foi a aplicação e utilização do N4SID como uma ferramenta para a identificação dos modos eletromecânicos, e por esta razão o método foi implementado utilizando a função “n4sid” do *System Identification Toolbox* do Matlab (MATH WORKS, 1991). Os principais fundamentos do método são descritos no item a seguir.

3.6.2. Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification - N4SID

O N4SID é um método baseado na estimação do modelo linear do sistema (KATAWAMA, 2005), para o qual o modelo de equações lineares é dado pelas equações (3.30).

Conforme visto no Item 3.3, para a avaliação dos modos de oscilação eletromecânica do sistema é necessária somente a determinação da matriz de estados $A_{n \times n}$, pois é a partir de seus autovalores que os modos são identificados. Portanto, o interesse é aplicar o método de estimação até a determinação da matriz A , não sendo necessário determinar as matrizes B , C e D , neste caso.

O algoritmo resumido com seus principais conceitos apresentados nesta seção foi baseado nas referências (KATAWAMA, 2005), (JEREMIAS, 2012) e (CLAVIJO, 2008). Para o algoritmo de estimação que assume um modelo determinístico, a entrada $u(t)$ deve ser conhecida e a entrada aleatória da variação de carga, $v(t)$, deve ser nula. Para este modelo determinístico, as variações de carga inerentes ao sistema são consideradas como entradas de controle do sistema, e esta entrada pode ser modelada como um ruído branco.

Assim, o sistema em espaço de estados no tempo discreto k pode ser escrito pela equação (3.31).

$$\begin{aligned} x[k+1] &= A \cdot x[k] + B \cdot u[k] \\ y[k] &= C \cdot x[k] + D \cdot u[k] \end{aligned} \tag{3.31}$$

em que as matrizes A , B , C e D possuem definição dada pela equação (3.10), $u[k] \in \mathbb{R}^r$ são as entradas do sistema e são sinais controláveis, $y[k] \in \mathbb{R}^m$ são as

saídas do sistema e são sinais observáveis e $x[k] \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados do sistema.

Para o algoritmo, é necessário definir parâmetros iniciais como o tamanho adequado da janela, taxa de amostragem, ordem do modelo (n) e o número de blocos linha (L). As matrizes de entrada U e saída Y são divididas em passado e futuro, de tal maneira que deve-se definir o tempo presente que é dado pelo parâmetro L .

Para os algoritmos de estimação por subespaços, são utilizadas as matrizes em blocos de Hankel (JEREMIAS, 2012). Desta forma, define-se a matriz de Hankel com os dados de entrada, $U_{0|q-1}$, e a matriz de Hankel com os dados de saída, $Y_{0|q-1}$. Estas são dadas pelas equações (3.32) e (3.33), respectivamente.

$$U_{0|q-1} = \begin{bmatrix} u[0] & u[1] & \cdots & u[M-1] \\ u[1] & u[2] & \cdots & u[M] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u[q-1] & u[q] & \cdots & u[q+M-2] \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$Y_{0|q-1} = \begin{bmatrix} y[0] & y[1] & \cdots & y[M-1] \\ y[1] & y[2] & \cdots & y[M] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y[q-1] & y[q] & \cdots & y[q+M-2] \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Estas duas matrizes possuem dimensão $q \times M$ onde q é o número de linhas da matriz, N a quantidade de pontos do intervalo e M o número de colunas dado pela relação $M = N - 2q + 1$. Os subscritos $0|q-1$ das matrizes identificam o primeiro e último elemento da primeira coluna, ou seja, para a matriz de saída, $y[0]$ é o primeiro elemento da coluna e $y[q-1]$ o último.

Outros importantes conceitos que devem ser apresentados para este método são os de matriz de observabilidade e matriz de controlabilidade, dados pelas equações (3.34) e (3.35), respectivamente.

$$\mathcal{O}_L = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{L-1} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\mathcal{C}_L = [B \quad AB \quad \cdots \quad CA^{L-1}] \quad (3.35)$$

onde L é o número de blocos linha. Também é necessário definir a matriz Toeplitz dada na equação (3.36).

$$\psi_L = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{L-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{L-3} & \cdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Com estas definições apresentadas anteriormente e sendo $\mathbf{X}_0 = [x(0) \ x(1) \ \cdots \ x(N-1)]$, onde N é a quantidade de amostras obtidas do intervalo, o sistema de equações (3.31) é reescrito pela equação (3.37).

$$\mathbf{Y}_{0|L-1} = \mathcal{O}_L \mathbf{X}_0 + \psi_L \mathbf{U}_{0|L-1} \quad (3.37)$$

Este método identifica as matrizes do subespaço de estados através da recuperação dos estados passados, p , e futuros, f , do sistema. Assim, reescreve-se a equação (3.37) como a equação (3.38).

$$\mathbf{Y}_p = \mathcal{O}_L \mathbf{X}_p + \psi_L \mathbf{U}_p \quad (3.38)$$

$$\mathbf{Y}_f = \mathcal{O}_L \mathbf{X}_f + \psi_L \mathbf{U}_f$$

Para a construção das entradas e saídas passadas e futuras, são definidas ainda as matrizes $\mathbf{W}_p$ e $\mathbf{W}_f$, conforme a equação (3.39). O parâmetro L é o mesmo já definido, que se refere ao número de blocos de linha e também ao estado presente.

$$\mathbf{W}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{Y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{0|L-1} \\ \mathbf{Y}_{0|L-1} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\mathbf{W}_f = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_f \\ \mathbf{Y}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{L|2L-1} \\ \mathbf{Y}_{L|2L-1} \end{bmatrix}$$

Para as matrizes de entrada e saída é utilizada a decomposição LQ, que consiste na decomposição da matriz original em uma matriz L triangular inferior e em uma matriz Q ortogonal tal que $Q^T = Q^{-1}$. Desta forma, tem-se a equação (3.40).

$$\begin{bmatrix} U_f \\ W_p \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

O desenvolvimento das equações (3.40) leva à relação dada pela equação (3.41).

$$Y_f = [L_{32} \cdot L_{22}^\dagger] W_p + [(L_{31} - L_{32} \cdot L_{22}^\dagger \cdot L_{21}) \cdot L_{11}^{-1}] \cdot U_f \quad (3.41)$$

onde $(\dagger)$ indica matriz pseudoinversa. O parâmetro de interesse obtido por este desenvolvimento é o parâmetro ξ definido pela equação (3.42).

$$\xi = [L_{32} \cdot L_{22}^\dagger] W_p \quad (3.42)$$

Este parâmetro, quando comparado à equação (3.38), equivale a $\xi = \mathcal{O}_L X_f$. A equação (3.42) corresponde à projeção oblíqua das saídas futuras, Y_f , no subespaço das entradas e saídas passadas, W_p , na direção das entradas futuras, U_f , em termos da decomposição LQ.

Uma vez identificada a matriz ξ , esta é submetida à decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD), obtendo-se a relação dada pela equação (3.43).

$$\xi = U \Sigma V^* = [\hat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^* \quad (3.43)$$

em que U e V são matrizes quadradas ortogonais ou unitárias e Σ é uma matriz diagonal cujos elementos na diagonal são os valores singulares dispostos em ordem crescente. Da igualdade à direita, o índice $(\wedge)$ indica a dimensão n dos valores singulares mais significativos para as matrizes $\hat{\Sigma}$, $\hat{U}$, e $\hat{V}$ e o índice (0) indica a dimensão dos valores singulares que serão desprezados (JEREMIAS, 2012). O índice $(*)$ denota o complexo conjugado transposto da matriz.

A dimensão do sistema é dada pela equação (3.44).

$$n = \dim(\hat{\Sigma}) \quad (3.44)$$

Da equação (3.43), podemos obter as equações (3.45). e (3.46).

$$\mathcal{O}_L = \hat{\mathbf{U}} \cdot \hat{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{X}_f = \hat{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \cdot \hat{\mathbf{V}}^T \quad (3.46)$$

A definição do vetor de estados futuros é conforme a equação (3.47).

$$\mathbf{X}_f = \bar{\mathbf{X}}_L = [x(L) \quad x(L+1) \quad \cdots \quad x(L+N-2) \quad x(L+N-1)] \quad (3.47)$$

De maneira análoga, obtem-se as definições das seguintes matrizes:

$$\bar{\mathbf{X}}_{L+1} = [x(L+1) \quad x(L+2) \quad \cdots \quad x(L+N-1)] \quad (3.48)$$

$$\bar{\mathbf{U}}_{L|L} = [u(L) \quad u(L+1) \quad \cdots \quad u(L+N-2)] \quad (3.49)$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{L|L} = [y(L) \quad y(L+1) \quad \cdots \quad y(L+N-2)] \quad (3.50)$$

Com $\bar{\mathbf{X}}_{L+1}$, podemos obter o sistema no espaço de estados com base na equação (3.46), expresso como a equação (3.51).

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_{L+1} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L|L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_L \\ \bar{\mathbf{U}}_{L|L} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Este sistema é um sistema linear de incógnitas $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{D}$, as quais podem ser obtidas através do método dos mínimos quadrados conforme equação (3.52).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_{L+1} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L|L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_{L+1} \\ \bar{\mathbf{U}}_{L|L} \end{bmatrix}^T \right) \cdot \left(\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_L \\ \bar{\mathbf{U}}_{L|L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}_{L+1} \\ \bar{\mathbf{U}}_{L|L} \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \quad (3.52)$$

Uma vez identificada a matriz $\mathbf{A}$, os modos de oscilação podem ser obtidos através do cálculo de seus autovalores. A Figura 10 apresenta o fluxograma simplificado do algoritmo N4SID de acordo com (CLAVIJO, 2008).

Este método de subespaço de estados é baseado na suposição de que os dados são gerados por um sistema invariante no tempo estimulados por um ruído branco. Por esta razão, o método tem melhor desempenho para longas sequências de dados.

Nesta abordagem apresentada, os parâmetros definidos pelo analista são o tamanho da janela de dados, a ordem, cuja prática para sistemas de grande porte é um número elevado de 20 a 25 e o número de linhas de blocos, normalmente entre 6 a 10 vezes o valor da ordem (UFSC,2015).

Figura 10 - Fluxograma do Método N4SID.

Conforme comentado anteriormente, neste trabalho foi utilizada a função 'n4sid' do MATLAB onde os parâmetros de entrada são apenas o sinal amostrado, a entrada e a ordem. Além disso, apesar de ser uma técnica de estimação em tempo discreto, o comando no MATLAB permite a identificação direta em tempo contínuo fazendo o tempo de amostragem igual a zero.

Utilizando estas duas técnicas de estimação modal baseadas em medidas, o Prony e o N4SID, e considerando um sistema de simulação que represente um

sistema com geração síncrona distribuída (levando em consideração suas principais características), será avaliado qual tipo de técnica se adequa melhor a estes sistemas. Desta forma, será possível identificar quais principais aspectos podem ser levados em conta para a escolha do método mais adequado para a análise de pequenas perturbações por estimação modal a partir de medidas em sistemas com geração síncrona distribuída.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados dois cenários de estudos nos quais o sistema teste representa uma planta de geração distribuída do tipo sucroalcooleira conectada a um sistema de distribuição. No primeiro cenário é considerado um sistema equivalente para a barra de 138 kV na qual está conectada a barra de 13,8 kV da planta de cogeração. Já no segundo cenário, o sistema de 138 kV é uma barra do modelo do SIN localizada no interior do estado de São Paulo, e são utilizados os casos de referência para simulação dinâmica disponibilizados pelo ONS. As simulações foram realizadas nos programas ANAREDE (CEPEL, 2011) e ANATEM (CEPEL, 2012). O ANAREDE é um programa para análise estática de redes com funções integradas de fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, despacho de potência ativa e fluxo de potência continuado e o ANATEM é um programa de simulação dinâmica para análise de transitórios eletromecânicos. Ambos os programas foram desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Os sinais resultantes das simulações dinâmicas realizadas pelo ANATEM foram processados no MATLAB (MATH WORKS, 1991).

4.1. Cenário de Estudo para o Sistema Equivalente

O sistema teste em estudo é o de uma usina sucroalcooleira com geração própria e exportação do excedente de geração. Esta usina está conectada a uma subestação de 13,8 kV, que por sua vez é conectada a um sistema de 138 kV modelado por um sistema equivalente, conforme apresentado no diagrama unifilar da Figura 11.

A barra 1 é o sistema equivalente de 138 kV, modelado dinamicamente como barra infinita, e a barra 2 é a subestação de 13,8 kV que possui sua carga local e o ponto de acoplamento comum ao qual a usina sucroalcooleira está conectada. A barra 3 é a usina sucroalcooleira com uma carga equivalente, um banco de capacitores e um barramento interno (barra 4), ao qual está conectado o gerador.

Figura 11 - Diagrama unifilar.

As simulações são realizadas considerando diferentes naturezas de perturbações, sendo estas:

- i) Uma pequena perturbação na barra 3, que produza uma resposta transitória do sistema para que seja utilizada uma técnica de estimação da categoria *ringdown*, conforme descrito no capítulo anterior;
- ii) Uma variação aleatória de carga permanente na barra 2, que represente os constantes chaveamentos de carga do sistema, para que seja utilizada uma técnica da categoria do tipo *mode-meter algorithms*;
- iii) A composição das anteriores.

De acordo com a natureza da perturbação, serão aplicadas técnicas específicas para a identificação de modos de oscilação eletromecânica. Além disso, para avaliação do desempenho das técnicas diante de diferentes tipos de controladores

comumente utilizados em pequenas gerações, serão alternados três diferentes tipos de controle na máquina síncrona, identificados como casos de 1 a 3, sendo eles:

- a) **Caso 1:** Controlador de tensão;
- b) **Caso 2:** Controlador de fator de potência;
- c) **Caso 3:** Regulador de fator de potência.

4.1.1. Dados do Sistema Teste

Neste item são apresentados os dados e o modelo do sistema teste, tanto estático quanto dinâmico.

a) Modelo Estático da Rede

Os dados do modelo estático da rede são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados das barras para o fluxo de carga.

Barra	V (pu)	Ângulo (graus)	Tipo	Gerador		Carga		Shunt
				P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	Q (MVAR)
1	1.009	-32.0	V θ / Slack	-	-	-	-	-
2	-	-	PQ		-	5.75	2.45	-
3	-	-	PQ	-	-	3.50	2.15	0.23
4	1.000	-	PQ/PV	8.0	0.0	-	-	-

Para o gerador com o AVR, a barra 4 é identificada como PV. Para o gerador atuando como o controlador ou regulador de fator de potência, a barra é do tipo PQ, uma vez que se deseja manter o despacho apenas de potência ativa, mantendo o fator de potência igual a 1,0. Esta configuração é comum em usinas de cogeração onde se deseja gerar o máximo de potência ativa, maximizando o retorno, e também evitando sobreaquecimentos e diminuição da vida útil dos enrolamentos da máquina. Caso a planta industrial necessite de um ajuste de fator de potência no ponto de conexão, este ajuste normalmente é feito através de banco de capacitores ao invés de geração de potência reativa com o gerador da planta.

Os dados de resistência e reatância compõem os dados de linha apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados das linhas de transmissão e transformador que conectam as barras.

De	Para	Elemento	R (%)	X_l (%)
1	2	Transformador	3.99	63.875
2	3	Linha	180.	76.0
3	4	Linha	1.8	0.76

b) Modelo Dinâmico do Gerador

Para o gerador, foi utilizado um modelo pré-definido do ANATEM de máquina síncrona de rotor de pólos lisos, com um enrolamento de campo e três enrolamentos amortecedores (CEPEL, 2012), (IEEE, 1989). Os parâmetros fornecidos para os geradores são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5: Constantes de tempo dos geradores.

Constantes de tempo (s)		
T'_{do}	Transitória de eixo d	7.8
T''_{do}	Subtransiente de eixo d	0.066
T'_{qo}	Transitória de eixo q	3.0
T''_{qo}	Subtransiente de eixo q	0.075

Tabela 6: Parâmetros dos geradores.

Dados			Unidade
S	Potência nominal	10.0	MVA
V	Tensão nominal	13.8	kV
H	Constante de inércia	0.7	s
x_d	Reatância de eixo direto	2.06	pu
x'_d	Reatância transitória de eixo direto	0.398	pu
x''_d	Reatância subtransitória de eixo direto	0.244	pu
x_q	Reatância de eixo quadratura	2.5	pu
x'_q	Reatância transitória de eixo quadratura	0.30	pu

Tanto estes parâmetros, quanto os parâmetros dos controladores regulador de velocidade e regulador de tensão foram obtidos do trabalho (FERNANDES T. C., 2012) com algumas adaptações. Os valores em p.u. tem como base a potência e a tensão da máquina.

c) Regulador de Velocidade

Para o regulador de velocidade é adotada uma simplificação do modelo de turbina a vapor IEEE TGOV1 (IEEE, 2013), apresentado na Figura 12. Este modelo representa o efeito do regulador de velocidade e a dinâmica da turbina a vapor com reaquecimento através de uma função de transferência simplificada.

Figura 12 - Modelo do regulador de velocidade.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros do regulador de velocidade, onde R_v representa o estatismo da máquina, T_{v1} a constante de tempo do regulador, e T_{v2} a constante de tempo de reaquecimento da turbina.

Tabela 7: Parâmetros do regulador de velocidade.

Dados		Unidade
R_v	0.05	p.u.
T_{v1}	0.05	s
T_{t1}	1.5	s
T_{t2}	5	s

d) Regulador de Tensão

O regulador de tensão, ou AVR (*Automatic Voltage Regulator*), utilizada uma versão simplificada do regulador padrão ST1A do IEEE (IEEE, 2006), cujo modelo é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Modelo do regulador de tensão.

onde V_{ref} é a tensão de referência fornecida pelo fluxo de carga, V_T é a tensão terminal da barra interna do gerador e E_{fd} é a tensão de campo fornecida pelo regulador de tensão. A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados no modelo.

Tabela 8: Parâmetros do regulador de tensão.

Dados		Unidade
R_a	120	pu/pu
T_a	0.15	s

e) Controlador de Fator de Potência

Um controlador de fator de potência é definido em (IEEE, 2006) como “uma função de controle que atua através do ajuste de referência que altera o *set point* do regulador de tensão para manter o fator de potência de regime permanente da máquina síncrona em um valor predeterminado”. Basicamente, o controlador consiste em uma malha de controle externa sobreposta ao controle de tensão. Esta malha adicional é um controlador do tipo PI (Proporcional-Integral), cuja implementação está mostrada no modelo da Figura 14.

Figura 14 - Modelo do controlador de fator de potência.

Os parâmetros K_p e K_i foram ajustados de modo que a atuação do PI fosse mais lenta do que o laço de controle do controlador de tensão, portanto, sua ação se dá em uma escala de tempo maior do que a atuação do AVR. Os parâmetros do PI foram ajustados baseados no método de Ziegler-Nichols e seus valores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros do controlador de fator de potência.

Dados	
K_a	120
T_a	0.15
K_P	1.0
K_I	0.4

f) Regulador de Fator de Potência

Um regulador de fator de potência é uma versão simples do controlador de fator de potência e pode ser definido como um regulador de máquina síncrona que tem a função de manter o fator de potência em um determinado valor. A diferença do regulador para o controlador de fator de potência é que este é composto apenas de um PI cuja saída atua diretamente na tensão de campo. O modelo do regulador de fator de potência é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Modelo do regulador de fator de potência.

Os parâmetros do modelo foram os mesmos do controlador de fator de potência e são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros do regulador de tensão.

Dados	
K_P	1.0
K_I	0.4

g) Modelo de Carga Dinâmica

As variações aleatórias de carga no tempo, que serão a entrada de estímulo dos modos de oscilação eletromecânica, são modeladas como um ruído branco através de um gerador de números pseudo-aleatórios “*minimal standard generator*” (PARK, 1988), (De MARCO, 2013). O algoritmo se baseia na escolha de dois inteiros fixos, m e a tais que:

- i) O parâmetro m é um número primo inteiro de valor elevado; e
- ii) O parâmetro multiplicador a é um inteiro no intervalo $[2, m - 1]$.

Os valores de m e a foram escolhidos como $m = 2^{31} - 1$ e $a = 7^5$ de acordo com a referência (PARK, 1988). A geração posterior da sequência de inteiros $z_1, z_2, z_3, \dots$ se dá pela equação iterativa:

- iii) $z_{n+1} = f(z_n)$ para $n = 1, 2, \dots$;

e a função geradora é definida como

- iv) $f(z) = a \cdot z \cdot \text{mod}(m)$;

A função $\text{mod}(m)$ é o resto da divisão por m . A sequência $\{z_n\}$ de inteiros é inicializada pela escolha de uma semente inicial z_1 no intervalo $[1, m - 1]$. Como passo final, a sequência é normalizada pela divisão por m , que irá produzir a sequência real $u_1, u_2, u_3, \dots$ onde:

- v) $u_n = z_n / m$ para $n = 1, 2, \dots$

Mais detalhes sobre o algoritmo podem ser encontrados em (PARK, 1988), (De MARCO, 2013), (PRIOSTE, 2011). Este gerador de números pseudo-aleatórios foi implementado no ANATEM na forma de diagramas de blocos como um CDU (Controlador Definido pelo Usuário) e associado à carga dinâmica através do código de execução DLDN (CEPEL, 2012). Este código permite modelar uma parcela da carga da barra CA (Corrente Alternada) por um controle que descreva uma dinâmica. O modelo em diagrama de blocos deste CDU é apresentado na Figura AII do Apêndice A.II. A carga que varia aleatoriamente é a carga da barra 2. A

porcentagem especificada de carga modelada como carga dinâmica será variada para que seja possível observar o seu impacto nos algoritmos de identificação modal.

4.2. Identificação Modal por Análise Linear utilizando o Modelo - PacDyn

O primeiro conjunto de resultados gerados neste trabalho se refere à identificação dos modos de oscilação eletromecânica a partir do modelo linearizado do sistema teste. Neste caso, não é necessário nenhuma perturbação ou estímulo ao sistema, apenas o conhecimento de seus parâmetros, já que os modos de oscilação são características intrínsecas ao modelo. O programa utilizado para a identificação é o PacDyn, do CEPEL (CEPEL, 2015). O PacDyn é um programa computacional para análise e controle de oscilações resultantes de pequenas perturbações em sistemas elétricos. Este programa faz a leitura do próprio banco de dados do ANATEM e fornece os autovalores da matriz A do modelo linearizado.

Os modos apresentados na Tabela 11 são apenas os referentes às oscilações eletromecânicas do gerador que estão referidas às velocidades angulares do rotor para cada um dos três tipos de caso.

Tabela 11: Modos de oscilação eletromecânica pelo PacDyn

Casos	Modo		Freq. (Hz)	Amort ¹ .(%)
	Real	Imaginária		
Caso 1	-2,3416	± 27,530	4,3816	8,4749
Caso 2	-2,3460	± 27,588	4,3908	8,4730
Caso 3	-2,3697	± 27,358	4,3542	8,6293

Para os controles distintos não há grande variação na taxa de amortecimento do sistema, que pode ser considerado satisfatoriamente amortecido, uma vez que $\zeta > 5\%$, conforme citado no Capítulo 3.

¹ Amort.: É o amortecimento conforme definido na equação (XX do capítulo 4 – ver depois)

4.3. Estimação Modal a partir de uma Pequena Perturbação

Diferentemente da identificação modal através do modelo pelo PacDyn, a identificação feita por técnicas de estimação modal não pressupõe o conhecimento dos parâmetros do sistema. Neste caso, é utilizado somente o sinal de saída no tempo da velocidade angular do rotor para a identificação dos modos.

Nesta análise, o sinal de saída da velocidade angular do rotor é gerado através da simulação no tempo do modelo não-linear aplicando uma perturbação ao sistema. Esta simulação é realizada no programa ANATEM.

Sabe-se que um sistema elétrico de potência possui intrinsecamente um modelo/comportamento não-linear. Por esta razão, para a identificação de um modelo linearizado através de um sinal de saída, deve-se garantir que este sinal também possua um comportamento linear. Para garantir esta condição, é aplicada uma pequena perturbação no sistema, de forma que não o afaste consideravelmente do seu ponto de equilíbrio. Assim, com este sinal de saída pode-se reconstruir, através de técnicas específicas de estimação modal do tipo *ringdown*, um modelo linear para o sinal de tal forma que este modelo produza uma saída equivalente à saída medida. Neste trabalho é aplicada a técnica de Prony para identificação modal a partir de uma pequena perturbação do sistema.

Primeiramente será analisada a resposta do sistema considerando apenas a perturbação, em seguida é analisada a resposta do sistema considerando a perturbação e as variações aleatórias de carga a ela superpostas.

4.3.1. Pequena Perturbação: *Ringdown Analysis*

Neste primeiro subitem, a perturbação aplicada foi um curto-circuito na barra 3 no instante $t = 0,2 \text{ s}$, com resistência de aterramento de 300 ohm e duração de 300 ms. O tempo total de simulação foi de 3s. A Figura 16 mostra o comportamento da velocidade angular do rotor no tempo para os casos 1, 2 e 3 em todo o intervalo de simulação. Conforme já foi citado, e pode ser também observado através desta figura, os modos de oscilação para os três casos são muito semelhantes.

Figura 16 - Resposta da frequência diante da pequena perturbação para os casos 1, 2 e 3.

O intervalo utilizado na aplicação da técnica de Prony foi de 0,4 s a 2 s, eliminando a descontinuidade do instante de retirada da falta e o primeiro meio ciclo da perturbação, que pode apresentar um comportamento não linear. Como já apresentado no Capítulo 3, para a aplicação da técnica de Prony, deve-se selecionar uma porção linear da curva para melhorar o resultado.

A Tabela 12 apresenta os resultados do Prony obtidos utilizando ordem 31 e intervalo de amostras $T = 0,01$ s. A ordem 31 foi escolhida como a mais adequada a partir de testes realizados para o intervalo de amostragem escolhido.

Tabela 12: Modos de oscilação eletromecânica pelo método Prony

Casos	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Diferença ² (%)
	Real	Imaginária			
Caso 1	- 2,4444	$\pm 27,392$	4,3596	8,8884	4,88
Caso 2	- 2,4440	$\pm 27,399$	4,3607	8,8847	4,86
Caso 3	- 2,4129	$\pm 27,166$	4,3237	8,8470	2,52

Nesta tabela é inserido o conceito de “**diferença**”, o qual se refere a diferença em relação aos resultados do PacDyn, tomados com base de comparação. Como

² Esta diferença em porcentagem é do amortecimento estimado com relação aos resultados do PacDyn.

pode ser observado na tabela, esta diferença é pequena, girando em torno de 5%, exceto no caso 3, que apresentou uma diferença menor.

4.3.2. Pequena Perturbação com dados Ambiente superpostos: *Ringdown Analysis*

Neste item, além da perturbação simulada por um curto-circuito, também é considerada, concomitantemente a ela, uma variação aleatória de carga na barra 2 que produzirá, além de um efeito transitório, uma saída caracterizada como um sinal de dados ambiente. Nesta primeira análise, a identificação modal ainda é realizada utilizando a técnica de Prony, que pertence à categoria de *Ringdown Analysis*. A intenção neste subitem é avaliar a influência da variação aleatória (ou ruído de entrada do sistema) em uma técnica da categoria *Ringdown* (neste caso, a técnica de Prony).

Estudos já realizados pelo grupo de pesquisa abordaram a influência do ruído de medição na identificação dos modos eletromecânicos através da técnica de Prony (GERALDI JUNIOR, 2012), (FERNANDES, GERALDI, & RAMOS, 2013). Estes estudos foram realizados adicionando um ruído branco diretamente ao sinal de saída, simulando assim os ruídos devido à interferência eletromagnética ou desgaste dos medidores. Já este trabalho, propõe a inserção do ruído de entrada no próprio sistema, que é simulado pelas variações aleatórias de carga. Assim, as porcentagens da carga modelada como carga dinâmica variam de 10 a 90% para avaliar sua influência no resultado final obtido.

Antes da aplicação da técnica em si, o sinal é pré-processado através da aplicação de um filtro para que o ruído observado no sinal de saída não interfira, ou tenha seu impacto minimizado, na estimação do modo eletromecânico. O objetivo da filtragem do sinal é a eliminação de suas componentes de alta frequência, uma vez que as componentes de baixa frequência devem ser mantidas para não eliminar ou alterar o modo eletromecânico que possui frequência menor que 10 Hz. O filtro implementado no MATLAB é um filtro digital de Butterworth, passa-baixa, de quarta ordem com frequência de corte de 40 Hz.

A Figura 17, a Figura 18, a Figura 19 e a Figura 20 apresentam as comparações entre os sinais originais, os sinais filtrados e os sinais reconstruídos através da técnica de Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como carga dinâmica na barra 2 e utilizando o AVR como controlador. Tais porcentagens são 10, 40, 60 e 80%, respectivamente. A carga ativa da barra 2 é de 5,75 MW. Portanto, para cada 10% de carga modelada como carga dinâmica, 0,575 MW de potência ativa são modelados como uma variação aleatória de carga, conforme modelo apresentado no item 4.1.1. subitem g).

É possível observar pelas figuras que o filtro provoca uma pequena defasagem no sinal filtrado com relação ao sinal original. Contudo, esta defasagem não provoca erros na estimação modal, uma vez que a mesma preserva as características intrínsecas ao sinal que são necessárias para estimação. Também pode ser observado que, mesmo com a filtragem, o sinal apresenta ruído. Isso ocorre porque o filtro não é capaz de atenuar satisfatoriamente componentes de maior amplitude.

Figura 17 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para o Caso 1 com variação aleatória de 10% carga ativa.

Figura 18 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 40% carga ativa.

Figura 19 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 60% carga ativa.

Figura 20 - Comparação entre o sinal original, sinal filtrado e sinal estimado por Prony para Caso 1 com variação aleatória de 80% carga ativa.

A Tabela 13 apresenta os resultados do Prony com ruído e filtragem obtidos utilizando a ordem de 31 e intervalo de amostras $T = 0,01$ s.

Tabela 13: Modos de oscilação eletromecânica pelo método Prony com ruído.

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer.A ³ (%)	Difer.B ⁴ (%)
		Real	Imaginária				
Caso 1	10	- 2,3295	± 27,4104	4,3625	8,4681	0,1	4,7
	20	- 2,3969	± 27,7088	4,4100	8,6181	1,7	3,0
	30	- 2,3355	± 27,8370	4,4304	8,3605	1,3	5,9
	40	- 2,2586	± 27,9300	4,4452	8,0603	4,9	9,3
	50	- 2,1930	± 27,9614	4,4502	7,8189	7,7	12,0
	60	- 2,1246	± 27,9526	4,4488	7,5789	10,6	14,7
	70	- 2,0736	± 27,9250	4,4444	7,4052	12,6	16,7
	80	- 2,0157	± 27,8791	4,4371	7,2113	14,9	18,9
	90	- 1,9712	± 27,8257	4,4286	7,0664	16,6	20,5

³ **Difer.A:** Diferença do amortecimento com relação aos resultados do PacDyn.

⁴ **Difer.B:** Diferença do amortecimento com relação aos resultados do Prony sem ruído.

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort.(%)	Difer.A ⁵ (%)	Difer.B ⁶ (%)
		Real	Imaginária				
Caso 2	10	- 2,4930	± 27,6429	4,3995	8,9821	6,0	1,1
	20	- 2,4379	± 27,8081	4,4258	8,7334	3,1	1,7
	30	- 2,3593	± 27,9407	4,4469	8,4140	0,7	5,3
	40	- 2,2617	± 28,0419	4,4630	8,0393	5,1	9,5
	50	- 2,1593	± 28,1009	4,4724	7,6615	9,6	13,8
	60	- 2,0567	± 28,1342	4,4777	7,2909	14,0	17,9
	70	- 1,9741	± 28,1424	4,4790	6,9975	17,4	21,2
	80	- 1,8915	± 28,1304	4,4771	6,7089	20,8	24,5
	90	- 1,8213	± 28,1009	4,4724	6,4677	23,7	27,2
Caso 3	10	- 2,4709	± 27,4022	4,3612	8,9807	4,1	1,5
	20	- 2,3666	± 27,5989	4,3925	8,5436	1,0	3,4
	30	- 2,2582	± 27,7409	4,4151	8,1135	6,0	8,3
	40	- 2,1512	± 27,8408	4,4310	7,7038	10,7	12,9
	50	- 2,0650	± 27,9124	4,4424	7,3780	14,5	16,6
	60	- 1,9832	± 27,9470	4,4479	7,0785	18,0	20,0
	70	- 1,9236	± 27,9602	4,4500	6,8636	20,5	22,4
	80	- 1,8721	± 27,9551	4,4492	6,6818	22,6	24,5
	90	- 1,8296	± 27,9369	4,4463	6,5350	24,3	26,1

Como pode ser visto na Tabela 13, o conceito de diferença, além do já definido anteriormente, também é utilizado com relação ao resultado obtido no caso apresentado na Tabela 12. Neste, deve-se ressaltar alguns aspectos ao definir um resultado base de comparação, uma vez que a carga modelada como carga dinâmica possui dinâmica própria que tem sua influência no modelo linearizado. Observando os resultados, percebe-se que os modos se afastam do valor base conforme a porcentagem de carga modelada como carga dinâmica é aumentada. Contudo, conforme esta porcentagem aumenta, o amortecimento do modo eletromecânico diminui, tornando o valor resultante do processo de identificação mais conservador.

Outra maneira de avaliar o desempenho da técnica, desta vez frente à influência de diferentes séries aleatórias na entrada, é realizando a análise de dispersão dos modos eletromecânicos estimados para cinquenta diferentes repetições, variando a semente inicial do gerador de números aleatórios. Analisando estes dados, foi

⁵ **Difer.A:** Diferença do amortecimento com relação aos resultados do PacDyn.

⁶ **Difer.B:** Diferença do amortecimento com relação aos resultados do Prony sem ruído.

avaliado o desvio padrão de cada conjunto de 50 simulações para os três casos em algumas condições de porcentagem de carga modelada como carga dinâmica. As porcentagens simuladas foram de 10, 40 e 80 %, uma vez que o número de casos simulados no programa ANATEM é muito grande para este estudo e não seria viável a simulação para as porcentagens de 10 a 90% em passos de 10%. Na Tabela 14 estão apresentados o desvio padrão das cinquenta repetições, representando a dispersão dos resultados, e a média das diferenças de cada estimativa com relação aos dados base, que é uma maneira de avaliar a precisão dos resultados. A partir destes resultados, observa-se uma tendência de aumento da dispersão dos resultados com o aumento da amplitude da variação aleatória de cargas e, conforme é aumentada a variação aleatória de carga, os resultados também se afastam dos resultados tomados como base fornecidos pelo PacDyn e pelo Prony sem a presença de ruído de entrada, representado pela média das diferenças com relação ao caso base.

Tabela 14: Desvio padrão e média das diferenças do Prony com relação aos resultados base.

Casos	% Carga Dinâmica	Desvio Padrão	Difer.I ⁷ (%)	Difer.II ⁸ (%)
Caso 1	10	0,20	9,4	4,3
	40	0,75	10,4	7,4
	80	1,43	13,3	12,6
Caso 2	10	0,19	10,4	5,3
	40	0,72	9,1	6,8
	80	1,38	12,8	12,3
Caso 3	10	0,14	7,3	4,6
	40	0,65	8,4	6,9
	80	1,33	12,2	11,5

A Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23 apresentam graficamente o aumento da dispersão dos resultados com o aumento da carga modelada como carga dinâmica para os Casos 1, 2 e 3, respectivamente.

⁷ **Difer.I:** Média das diferenças com relação aos resultados do PacDyn.

⁸ **Difer.II:** Média das diferenças com relação aos resultados do Prony sem ruído.

Figura 21 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 1.

Figura 22 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 2.

Figura 23 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados por Prony para diferentes porcentagens de carga modelada como dinâmica do Caso 3.

Nos resultados apresentados neste subitem, observa-se que a presença de ruído de entrada com amplitude elevada inviabiliza a aplicação do método de Prony. Como esta é uma condição mais significativa em sistemas de distribuição, uma possível solução seria o estudo de processos de filtragem mais eficientes que não comprometessem a estimação pela técnica de Prony. Outra possibilidade a ser explorada é a utilização de métodos de estimação modal para dados ambiente, que é abordagem apresentada neste trabalho.

4.4. Estimação Modal a partir de Dados Ambiente

Assim como a estimação modal a partir de uma pequena perturbação, a estimação a partir de dados ambiente não necessita do modelo do sistema, requerendo apenas o sinal amostrado de velocidade angular do rotor no tempo, denominado sinal de saída. A diferença deste processo de identificação, em comparação ao anterior, reside no fato que as técnicas de estimação modal que são empregadas são adequadas para sistemas continuamente afetado por pequenas

variações de entrada, e não somente por uma pequena perturbação em que ele assume um comportamento transiente até atingir um novo ponto de equilíbrio.

Para a estimação com dados ambiente neste trabalho foi utilizada uma técnica específica da categoria *mode-meter algorithms* denominada N4SID.

4.4.1. Dados Ambiente: resultados com N4SID

Neste subitem, o sistema é sujeito somente às variações aleatórias de carga que produzirão uma saída ruidosa suficiente para a identificação dos modos eletromecânicos por técnicas da categoria *mode-meter algorithms*. Como já foi mencionado no Capítulo 3, a vantagem de utilização desta categoria de identificação reside na possibilidade de utilizar dados de medição amostrados em tempo real sem que seja necessário inserir uma perturbação pequena (mas invasiva) no sistema, ou aguardar pela ocorrência natural de uma. A Figura 24 apresenta as variações aleatórias da carga dinâmica que estimulam o sistema para uma janela de simulação de 60s.

Figura 24 - Variações aleatórias de 10 % da potência ativa na barra 2.

Figura 25 – Velocidade angular de rotor para o sistema estimulado por variações aleatórias de carga.

A Figura 25 apresenta o sinal de saída velocidade angular de rotor resultante destas pequenas variações aleatórias de carga para uma janela de simulação também de 60s. Nesta figura está representado o sistema do Caso 1 com 10% de carga modelada como carga dinâmica.

De maneira análoga ao subitem anterior, são variadas as porcentagens da carga ativa da barra 2, que é modelada como carga dinâmica para avaliação do desempenho da técnica de identificação. Esta carga possui potência ativa total de 5,75 MW, e as porcentagens modeladas como carga dinâmica variam de 10 a 90%. A Tabela 15 apresenta os resultados do N4SID obtidos utilizando ordem igual a 6 para o sistema, intervalo de amostras $T = 0,003\text{ s}$ e tempo de simulação de 300 s. Estes parâmetros foram escolhidos com base em testes de forma que fossem obtidas a melhor janela e a melhor ordem para o intervalo de amostra considerado. Após a apresentação e avaliação dos modos de eletromecânicos obtidos, será apresentada uma breve avaliação da influência dos intervalos de simulação para o N4SID.

Tabela 15: Modo de oscilação eletromecânica pelo método N4SID com dados ambiente.

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer.A (%)	Difer.B (%)
		Real	Imaginária				
Caso 1	10	- 2,5531	± 27,3447	4,3520	9,2961	9,69	4,59
	20	- 2,5529	± 27,3543	4,3536	9,2924	9,65	4,55
	30	- 2,5522	± 27,3608	4,3546	9,2878	9,59	4,49
	40	- 2,5543	± 27,3632	4,3550	9,2944	9,67	4,57
	50	- 2,5563	± 27,3685	4,3558	9,2998	9,73	4,63
	60	- 2,5569	± 27,3740	4,3567	9,3003	9,74	4,63
	70	- 2,5582	± 27,3778	4,3573	9,3035	9,78	4,67
	80	- 2,5570	± 27,3837	4,3582	9,2971	9,70	4,60
	90	- 2,5579	± 27,3881	4,3590	9,2989	9,72	4,62
Caso 2	10	- 2,5841	± 27,3915	4,3595	9,3924	10,85	5,71
	20	- 2,5867	± 27,4299	4,3656	9,3885	10,81	5,67
	30	- 2,5745	± 27,4025	4,3612	9,3539	10,40	5,28
	40	- 2,5757	± 27,4078	4,3621	9,3566	10,43	5,31
	50	- 2,5804	± 27,4077	4,3621	9,3734	10,63	5,50
	60	- 2,5746	± 27,4140	4,3631	9,3502	10,35	5,24
	70	- 2,5771	± 27,4107	4,3625	9,3606	10,48	5,36
	80	- 2,5896	± 27,3951	4,3601	9,4107	11,07	5,92
	90	- 2,5836	± 27,4170	4,3636	9,3818	10,73	5,59
Caso 3	10	- 2,5600	± 27,1611	4,3228	9,3838	8,74	6,07
	20	- 2,5507	± 27,1691	4,3241	9,3473	8,32	5,65
	30	- 2,5568	± 27,1466	4,3205	9,3771	8,67	5,99
	40	- 2,5686	± 27,1440	4,3201	9,4209	9,17	6,49
	50	- 2,5826	± 27,2060	4,3300	9,4501	9,51	6,82
	60	- 2,5375	± 27,1806	4,3259	9,2952	7,72	5,07
	70	- 2,5888	± 27,1561	4,3220	9,4900	9,97	7,27
	80	- 2,4763	± 27,1645	4,3234	9,0781	5,20	2,61
	90	- 2,5698	± 27,1110	4,3148	9,4364	9,35	6,66

Como pode ser visto pelos resultados da Tabela 15, as diferenças com relação aos resultados do PacDyn e do Prony são maiores em parte dos resultados quando comparadas com a técnica de *ringdown* com a presença de ruído. Contudo, as mesmas não variam com relação ao aumento da variação aleatória de carga. Portanto, os resultados apresentaram uma maior uniformidade para os três casos.

Da mesma maneira que nos estudos *ringdown* com ruído, foi verificado o desempenho da técnica através da análise de dispersão dos resultados. Como no

estudo anterior, foram utilizadas 50 simulações para cada cenário de porcentagem de carga modelada como carga dinâmica. Na Tabela 16 estão apresentados os modos eletromecânicos identificados pelo método de N4SID, o desvio padrão das cinquenta repetições, representando a dispersão dos resultados, e a média das diferenças de cada estimativa com relação aos dados base.

Tabela 16: Desvio padrão e média das diferenças do N4SID com relação aos resultados base.

Casos	% Carga Dinâmica	Desvio Padrão	Difer.I (%)	Difer.II (%)
Caso 1	10	0,20	8,0	3,1
	40	0,75	8,3	3,3
	80	1,43	8,8	3,8
Caso 2	10	0,19	8,8	3,8
	40	0,72	9,5	4,7
	80	1,38	9,8	4,9
Caso 3	10	0,14	8,5	5,8
	40	0,65	8,4	5,9
	80	1,33	8,7	6,0

A partir dos resultados da Tabela 16, observa-se que não houve uma tendência a aumentar a dispersão dos resultados com o aumento da amplitude da variação aleatória de cargas, pois o desvio padrão não sofreu grandes alterações com relação ao aumento da carga modelada como carga dinâmica. Além disso, conforme é aumentada a variação aleatória de carga, as médias das diferenças com relação aos resultados tomados como base também não se alteram significativamente.

A Figura 26, a Figura 27 e a Figura 28 apresentam graficamente a dispersão dos resultados utilizando o método N4SID com o aumento da carga modelada como carga dinâmica para os Casos 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 26 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 1.

Figura 27 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 2.

Figura 28 - Comparação entre os modos eletromecânicos identificados pelo N4SID para diferentes porcentagens de entradas aleatórias de carga do Caso 3.

Em comparação ao método de Prony aplicado a um sinal com a presença de ruído de entrada, deve-se avaliar os benefícios da aplicação deste método do tipo *mode-meter algorithms*, uma vez que, além de a técnica ser minimamente invasiva e poder ser usada em qualquer amostragem de dados, ela apresenta uma maior uniformidade nos resultados com relação ao aumento da carga que varia aleatoriamente no terminal. Este fato pode ser uma vantagem para a identificação de modos de oscilação eletromecânica de geradores conectados a terminais de distribuição, que normalmente possuem uma parcela mais significativa da carga variando aleatoriamente próximas ao terminal do gerador.

Para definir uma janela de simulação adequada ao N4SID, foram realizados alguns testes variando a janela de simulação e observando o impacto desta variação no resultado final. São apresentados os resultados para o Caso 1, considerando um tempo de amostragem $T = 0,003 \text{ s}$, e a Tabela 17 apresenta o amortecimento e as diferenças com relação aos casos base para as janelas de simulação de 300 s, 240 s e 180s. A continuação desta análise é apresentada na Tabela 18, para os tempos

de simulação de 120s e 60s. novamente, a leitura de “*Difer.A*” para as duas tabelas é a diferença do amortecimento com relação ao resultado do PacDyn, enquanto “*Difer.B*” é a diferença do amortecimento com relação ao resultado do Prony sem ruído.

Tabela 17: Avaliação da influência da janela de simulação na técnica N4SID.

Ts	300 s			240 s			180 s		
% Carga Din.	Amort.	Difer.A (%)	Difer.B (%)	Amort.	Difer.A (%)	Difer.B (%)	Amort.	Difer.A (%)	Difer.B (%)
10	9,2961	9,7	4,6	9,2561	9,2	4,1	9,4439	11,4	6,2
20	9,2924	9,7	4,6	9,2925	9,6	4,5	10,0381	18,4	12,9
30	9,2878	9,6	4,5	9,2880	9,6	4,5	9,4873	11,9	6,7
40	9,2944	9,7	4,6	9,2888	9,6	4,5	9,4885	12,0	6,8
50	9,2998	9,7	4,6	9,2941	9,7	4,6	9,4959	12,0	6,8
60	9,3003	9,7	4,6	9,3703	10,6	5,4	9,8155	15,8	10,4
70	9,3035	9,8	4,7	9,2951	9,7	4,6	9,4943	12,0	6,8
80	9,2971	9,7	4,6	9,3697	10,6	5,4	9,5668	12,9	7,6
90	9,2989	9,7	4,6	9,3785	10,7	5,5	9,4826	11,9	6,7

Tabela 18: Avaliação da influência da janela de simulação na técnica N4SID (continuação).

Ts	120 s			60 s		
% Carga Din.	Amort.	Difer.A (%)	Difer.B (%)	Amort.	Difer.A (%)	Difer.B (%)
10	10,3695	22,4	16,7	11,5265	36,0	29,7
20	10,4534	23,3	17,6	12,9070	52,3	45,2
30	10,4065	22,8	17,1	11,4114	34,6	28,4
40	10,4045	22,8	17,1	11,4176	34,7	28,5
50	10,6261	25,4	19,6	11,4152	34,7	28,4
60	10,6004	25,1	19,3	11,6072	37,0	30,6
70	10,5989	25,1	19,2	11,4387	35,0	28,7
80	10,5916	25,0	19,2	11,3823	34,3	28,1
90	10,5777	24,8	19,0	11,3798	34,3	28,0

Como pode ser visto nas tabelas, para um tempo de simulação de até 240 s, os resultados se mantêm com boa uniformidade. Isto pode ser visto comparando as diferenças com relação aos resultados base para os tempos de 300 e 240 s. Já para

janelas menores do que esta, os resultados começam a apresentar maiores discrepâncias conforme o tempo de simulação diminui.

4.4.2. Dados Ambiente com perturbação: resultados com N4SID

Utilizando as mesmas simulações do item 4.3.2 com uma janela maior de tempo, que são as simulações com a pequena perturbação e as variações aleatórias concomitantemente, são obtidos os modos eletromecânicos aplicando desta vez o N4SID. Como já foi citado no Capítulo 3, técnicas de dados ambiente podem ser utilizadas tanto em sinais exclusivamente ruidosos quanto em sinais com a presença de pequenas perturbações, desde que o sistema apresente comportamento e resposta lineares. Para a aplicação do N4SID foi utilizada uma janela maior de dados. Desta forma, foi utilizada uma janela de 300s, ordem igual a 6 e intervalo de amostras $T = 0,003$ s. O resultado é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19: Modos eletromecânicos pelo método N4SID com pequena perturbação e ruído.

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer.A (%)	Difer. B (%)
		Real	Imaginária				
Caso 1	10	- 2,5652	$\pm 27,3596$	4,3544	9,3350	10,15	5,03
	20	- 2,5455	$\pm 27,3717$	4,3563	9,2597	9,26	4,18
	30	- 2,5620	$\pm 27,3577$	4,3541	9,3239	10,02	4,90
	40	- 2,5599	$\pm 27,3629$	4,3549	9,3147	9,91	4,80
	50	- 2,5632	$\pm 27,3687$	4,3559	9,3246	10,03	4,91
	60	- 2,5594	$\pm 27,3740$	4,3567	9,3090	9,84	4,73
	70	- 2,5603	$\pm 27,3777$	4,3573	9,3113	9,87	4,76
	80	- 2,5592	$\pm 27,3893$	4,3591	9,3034	9,78	4,67
	90	- 2,5598	$\pm 27,3883$	4,3590	9,3058	9,80	4,70
Caso 2	10	- 2,5570	$\pm 27,5368$	4,3826	9,2460	9,12	4,07
	20	- 2,5681	$\pm 27,5484$	4,3845	9,2818	9,55	4,47
	30	- 2,5790	$\pm 27,5285$	4,3813	9,3277	10,09	4,99
	40	- 2,5963	$\pm 27,5674$	4,3875	9,3765	10,66	5,53
	50	- 2,5759	$\pm 27,5452$	4,3840	9,3110	9,89	4,80
	60	- 2,5709	$\pm 27,5410$	4,3833	9,2943	9,69	4,61
	70	- 2,5842	$\pm 27,5449$	4,3839	9,3407	10,24	5,13
	80	- 2,6083	$\pm 27,5297$	4,3815	9,4322	11,32	6,16
	90	- 2,6022	$\pm 27,4680$	4,3717	9,4313	11,31	6,15

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer.A (%)	Difer. B (%)
		Real	Imaginária				
Caso 3	10	- 2,6139	$\pm 27,2659$	4,3395	9,5429	10,59	7,87
	20	- 2,5801	$\pm 27,2678$	4,3398	9,4201	9,16	6,48
	30	- 2,5628	$\pm 27,2646$	4,3393	9,3584	8,45	5,78
	40	- 2,5885	$\pm 27,2838$	4,3424	9,4450	9,45	6,76
	50	- 2,5740	$\pm 27,2851$	4,3426	9,3922	8,84	6,16
	60	- 2,5480	$\pm 27,2617$	4,3388	9,3059	7,84	5,19
	70	- 2,5879	$\pm 27,2907$	4,3435	9,4403	9,40	6,71
	80	- 2,5492	$\pm 27,3211$	4,3483	9,2902	7,66	5,01
	90	- 2,5694	$\pm 27,2784$	4,3415	9,3778	8,67	6,00

Os dados apresentados na Tabela 19 não diferem muito dos apresentados na Tabela 15, mostrando a eficácia do método também quando da presença de uma pequena perturbação no sinal de velocidade angular do rotor.

A Figura 29 apresenta alguns dos dados utilizados neste estudo considerando uma janela de 45 s para uma melhor visualização.

Figura 29 a - Sinais de velocidade angular de rotor no tempo com variação de 10 e 40% de carga aleatória e pequena perturbação no Caso 1.

Figura 29 b - Sinais de velocidade angular de rotor no tempo com variação de 60 e 80% de carga aleatória e pequena perturbação no Caso 1.

4.5. Cenário de Estudo para o Sistema Conectado ao SIN

O Sistema Interligado Nacional, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 30 é o sistema produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, de grande porte, com geração hidrotérmica e forte predominância de usinas hidrelétricas. Ele é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Com uma capacidade instalada total de quase 115GW, suas usinas são interligadas aos centros de consumo por cerca de 107 mil km de linhas de transmissão. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2015).

Na segunda parte dos estudos deste trabalho, em lugar de um barramento infinito, o sistema é conectado a uma barra de 138 kV da rede de simulação do SIN e é considerado todo o sistema interligado na simulação. Para isso, foi utilizado o caso de referência para estabilidade e transitórios eletromecânicos obtido no site do ONS. Estes casos de referência são constituídos por arquivos que compõem a base de dados para a utilização do programa ANATEM e o caso utilizado neste estudo foi o de Novembro de 2013.

Figura 30 - Diagrama unifilar do SIN.

Figura 31 - Região de conexão da planta de cogeração (Fonte:EPE).

A barra à qual o sistema foi conectado foi a barra de Rincão, localizada no interior do estado de São Paulo. A Figura 31 mostra a região de São Paulo onde a planta de cogeração foi conectada, com destaque no ponto de conexão. A Figura 32 apresenta o diagrama unifilar da conexão da planta de cogeração ao SIN. Os modelos e os parâmetros deste sistema são os mesmos apresentados no item 4.1.1. deste trabalho.

Figura 32 - Diagrama unifilar do sistema conectado ao SIN.

Neste item, além da simulação de dados ambiente próximos à carga, serão estimulados vários outros barramentos de carga distribuídos pelo SIN de acordo com o sugerido em (De MARCO, 2013). O objetivo é avaliar como as pequenas perturbações que ocorrem em todo o sistema interligado influenciam a estimação do modo eletromecânico do gerador distribuído. Desta forma, foram aplicadas perturbações aleatórias de carga em 40 barras do sistema que são especificadas na Tabela 20.

Tabela 20: Barras do SIN em que são inseridas perturbações aleatórias.

Cargas Aleatórias					Cargas Aleatórias				
ID	Potência Ativa (MW)	Tensão (KV)	Nome	Barra	ID	Potência Ativa (MW)	Tensão (KV)	Nome	Barra
#	5,75	13,8	SUB_13.8	2	21	284,3	69	FORTALEZ-069	5453
1	805,5	88	BANDEIRA-088	3493	22	243,2	88	NORDESTE-088	3443
2	565,6	88	OESTE-----88	3415	23	154,2	88	E.SOUZA--088	3411
3	770,5	88	MFORNAS--088	3496	24	280	138	CSN-----138	1673
4	735,2	88	LESTE----088	3465	25	244,4	69	MUSSURE--069	5213
5	460	88	NORD-BAND-88	3444	26	292	230	CBA-----230	607
6	700,4	88	RAMON----088	3467	27	288,7	69	D.GOUVEI-069	5473
7	416,7	88	NORTE-EP--88	3436	28	325,3	69	MIRUEIRA-069	5193
8	573,7	88	SUL1-----088	3475	29	340	88	NORTE-BAN-88	3437
9	410	88	S.JOSE----88	3455	30	367,3	138	R.LEAO---138	1745
10	379,8	88	B.JARDIM--88	3414	31	359,4	69	TERESINA-069	5503
11	290,5	88	PIRITUBA-088	3422	32	343,5	69	PITUACU--069	5843
12	533	88	ANHANGUER-88	3445	33	304,9	69	MACEIO---069	5313
13	426,2	88	SUL2-----088	3476	34	248,2	138	FUNIL----138	5904
14	170,4	69	NATAL-II-069	5243	35	291,6	69	BONGI----069	5156
15	422,3	138	EMBUGUAC-138	3583	36	293,2	69	JARDIM---069	5723
16	360,5	138	TAUBATE--138	3456	37	348,3	69	PICI-----069	5643
17	191,8	88	PIRATINI-088	3485	38	220,9	34	Polop-Liv-34	1337
18	360	440	CBA2-----440	603	39	173,1	138	ALCOA----138	4110
19	409	69	UTINGA---069	6482	40	905,5	230	V.CONDE--230	6461
20	369,6	88	JABAQUARA-88	3482					

Como foi mostrado anteriormente, considerando os três casos para diferentes controladores definidos no item 4.1.1, os modos eletromecânicos destes, além de serem semelhantes, não influenciam de maneira distinta a estimação modal. Portanto, neste item serão simulados os cenários apenas para o caso com controlador do tipo AVR. Apesar do controlador de fator de potência ser o mais comumente utilizado hoje em dia em geração síncrona distribuída, o crescimento desta fonte de geração faz com que ela possa vir a ser utilizada também como um auxílio do controle de tensão das regiões. Cabe ressaltar a importância do controle de tensão efetuado por todas as usinas do sistema, inclusive pelas PCHs e UTEs a biomassa localizadas nos sistemas de distribuição. Em conjunto, o elevado número dessas usinas tem impacto significativo no controle de tensão das redes de

transmissão e de distribuição. Além disso, tal procedimento está previsto no PRODIST.

As simulações são realizadas em 3 cenários distintos, considerando diferentes condições de perturbações no SIN, sendo estas:

- i) A porcentagem de variação aleatória de carga em cada uma das 40 barras de carga do SIN é de 1%, totalizando 156,6 MW variando aleatoriamente no SIN de forma distribuída;
- ii) A porcentagem é igual a 3%, totalizando 469,9 MW de variação aleatória no SIN;
- iii) A porcentagem é igual a 5%, totalizando 783,2 MW de variação aleatória no SIN.

4.5.1. Pequena Perturbação sem ruído no SIN: Resultado base de comparação.

O foco deste trabalho é a identificação de modos de oscilação eletromecânica por dados ambiente. E, desta forma, será aplicada apenas a técnica do N4SID para dados ambiente considerando todo o sistema interligado. O resultado base de comparação será o resultado obtido de um sinal do tipo *ringdown* utilizando a técnica de Prony. Assim, foi aplicado apenas um curto-circuito na barra 3, com resistência de aterramento de 300 ohm e duração de 300 ms, tempo total de simulação de 3s. A Tabela 22 apresenta os resultados do Prony obtidos utilizando ordem 31 e intervalo de amostras $T = 0,003$ s.

O modo de oscilação obtido será utilizado como base para o cálculo da “diferença” nos resultados obtidos pelo N4SID.

Tabela 21: Modo de oscilação eletromecânica pelo método Prony para sistema com o SIN.

Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)
Real	Imaginária		
-2,4711	$\pm 27,1491$	4,3209	9,0647

A Figura 33 mostra o comportamento do ângulo de rotor do gerador no tempo para a perturbação aplicada. São apresentados o sinal original obtido pelo programa ANATEM e o sinal reconstruído pela técnica de Prony.

Figura 33 - Resposta da velocidade angular diante da perturbação aplicada ao sistema conectado ao SIN.

4.5.2. Dados Ambiente no sistema conectado ao SIN: resultados com N4SID

Para cada cenário do SIN, descritos nos itens **i**, **ii** e **iii**, são variadas as porcentagens de variação aleatória da carga ativa da barra 2 de 10 a 90%, carga esta próxima ao gerador distribuído. A Tabela 22 apresenta os resultados do N4SID obtidos utilizando ordem igual a 6, intervalo de amostras $T = 0,003\text{ s}$ e tempo de simulação de 600 s.

Ao gerar os resultados considerando a ordem igual a 6, que foi a melhor ordem definida a partir de testes realizados, os resultados permaneceram próximos entre si indicando uma boa uniformidade da técnica, assim como nos estudos apresentados para o sistema equivalente.

Tabela 22: Modos de oscilação eletromecânica pelo N4SID para o sistema conectado ao SIN.

Casos	% Carga Dinâmica	Modo		Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer. ⁹ (%)
		Real	Imaginária			
SIN 1%	10	- 2,5142	± 27,1644	4,3233	9,2163	1,67
	20	- 2,6061	± 27,4252	4,3649	9,4598	4,36
	30	- 2,5911	± 27,3036	4,3455	9,4476	4,22
	40	- 2,6052	± 27,3601	4,3545	9,4789	4,57
	50	- 2,5923	± 27,2967	4,3444	9,4544	4,30
	60	- 2,5961	± 27,3225	4,3485	9,4591	4,35
	70	- 2,6045	± 27,3081	4,3462	9,4943	4,74
	80	- 2,6063	± 27,3181	4,3478	9,4974	4,77
	90	- 2,5983	± 27,2981	4,3446	9,4755	4,53
SIN 3%	10	- 2,5816	± 27,5229	4,3804	9,3387	3,02
	20	- 2,5912	± 27,4398	4,3672	9,4015	3,72
	30	- 2,5958	± 27,2584	4,3383	9,4802	4,58
	40	- 2,6105	± 27,3559	4,3538	9,4995	4,80
	50	- 2,6202	± 27,4123	4,3628	9,5150	4,97
	60	- 2,6009	± 27,3165	4,3476	9,4783	4,56
	70	- 2,5985	± 27,2926	4,3437	9,4781	4,56
	80	- 2,6095	± 27,3228	4,3486	9,5075	4,89
	90	- 2,6201	± 27,2862	4,3427	9,5584	5,45
SIN 5%	10	- 2,6113	± 27,8034	4,4251	9,3509	3,16
	20	- 2,5443	± 27,7623	4,4185	9,1262	0,68
	30	- 2,6395	± 27,6927	4,4074	9,4883	4,67
	40	- 2,5990	± 27,3461	4,3523	9,4615	4,38
	50	- 2,6062	± 27,2934	4,3439	9,5056	4,86
	60	- 2,5900	± 27,2559	4,3379	9,4601	4,36
	70	- 2,5993	± 27,2540	4,3376	9,4942	4,74
	80	- 2,6247	± 27,4263	4,3650	9,5264	5,09
	90	- 2,6062	± 27,3002	4,3450	9,5032	4,84

Além das perturbações próxima a carga, foram realizados testes apenas com as perturbações aplicadas ao SIN, que são as cargas da Tabela 20, de acordo com os cenários i, ii e iii. Nestas simulações, a porcentagem de carga dinâmica da barra 2 foi igual a 0%

Para os casos onde foram consideradas apenas as perturbações no SIN, que estão distantes do gerador, a estimação com ordem igual a 6 não identificou

⁹ **Difer.:** Diferença do amortecimento com relação ao resultado do Prony no SIN sem ruído.

adequadamente o modo de oscilação eletromecânica. Contudo, ao aumentar a ordem para a estimação, a técnica forneceu melhores resultados como pode ser observado resultados da Tabela 23. Nestes casos, foi necessária uma maior ordem na estimação que fornece um maior nível de detalhamento das oscilações do sistema. Os resultados obtidos para as melhores ordens encontradas nestas análises são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados obtidos pelo N4SID para o ruído apenas do SIN.

Carga Dinâmica SIN	Ordem N4SID	Sigma	Freq. (Hz)	Amort. (%)	Difer. (%)
1%	14	- 2,7144	4,3027	9,9904	10,21
3%	20	- 2,4017	4,2979	8,8588	2,27
5%	15	- 2,6119	4,2688	9,6922	6,92

Com os resultados apresentados na Tabela 22 e na Tabela 23 pode-se perceber que quando há uma variação de carga próxima ao gerador, as variações aleatórias do SIN não tem influência na identificação modal pelo N4SID. Também foi observado que, apesar de distantes, as perturbações do SIN estimulam o modo eletromecânico do gerador distribuído e estes dados ambientes podem ser usados para identificação através do N4SID, ainda que com menor precisão.

De modo geral, os resultados deste trabalho apontam para as vantagens da utilização de uma técnica de dados ambiente, o N4SID, em condições de perturbações contínuas próximas ao gerador. Esta é uma característica intrínseca a sistemas de distribuição com a presença de geradores distribuídos, que são mais sujeitos as variações aleatórias de carga próximas ao seu terminal.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou estudos de estabilidade angular a pequenas perturbações em sistemas com geração síncrona distribuída onde o foco do trabalho foi a análise de dados ambiente, que fornecem informações de como a dinâmica do sistema se comporta frente a eventos classificados como aleatórios (tais como variações em cargas que ocorrem natural e intermitentemente no sistema, por exemplo). Estes eventos também são denominados ruídos de entrada.

Primeiramente foi feito a análise de uma pequena perturbação para a utilização de métodos de *ringdown*, onde foi utilizado o método de Prony. Sobreposto a esta pequena perturbação, foi considerado o ruído de entrada em diferentes proporções, para avaliação do impacto do ruído de entrada no método de Prony. Foi observado que a presença deste ruído inviabiliza a identificação pelo método mencionado e que a qualidade da identificação é tão mais comprometida quanto maior a proporção de variação aleatória de carga nas proximidades do gerador.

Posteriormente, foram considerados apenas os dados ambiente e a técnica utilizada foi o N4SID. A técnica apresentou bons resultados, que não variaram significativamente com o aumento da amplitude do ruído de entrada. Os resultados se mantiveram uniformes mesmo com a extrapolação das condições de perturbação ambiente, onde foi considerado até 90% da carga conectada à subestação distribuidora adjacente variando aleatoriamente. Em condições onde foi considerada a pequena perturbação sobreposta aos dados ambiente, os resultados apresentados pelo método N4SID também foram satisfatórios. Além disso, observou-se na análise

de um conjunto de 50 simulações para cada cenário de porcentagem de variação aleatória que os resultados apresentaram menor dispersão utilizando o método N4SID em comparação ao caso onde se utiliza o método de Prony.

Nas simulações realizadas com o SIN concluiu-se que, quando há uma geração aleatória de carga próxima ao gerador, as variações aleatórias de carga distantes e distribuídas em diferentes pontos do SIN não influenciam a identificação modal pelo N4SID. Quando consideradas apenas as perturbações no SIN, estas sozinhas foram suficientes para a identificação, ainda que com menor precisão.

Ressalta-se que a principal contribuição deste trabalho foi a análise, em âmbito de simulações, da identificação modal através de dados ambiente de sistemas de distribuição com geradores síncronos de menor porte, considerando as características intrínsecas a estes sistemas (de cargas próximas ao gerador variando aleatória e continuamente).

Os resultados deste trabalho apontam para as vantagens da utilização do N4SID, uma técnica de dados ambiente, na identificação de modos de oscilação em sistemas com a presença de geradores síncronos distribuídos.

Como vantagens da utilização deste método, pode-se destacar a obtenção dos modos de oscilação a partir de dados de medição, não sendo necessária a construção do modelo. Tal processo de construção do modelo em níveis de distribuição pode-se tornar inviável devido a sua complexidade, ao elevado número de elementos a serem modelados e aos parâmetros incertos de difícil obtenção, por se tratar de um grande número de agente envolvidos.

A vantagem em comparação a utilização de técnicas da categoria *ringdown* se dá no fato de que muitas destas técnicas são sensíveis aos ruídos observados nos sinais medidos e que em níveis de distribuição são mais significativos, por se tratar de uma característica intrínseca a estes sistemas. Além disso, as técnicas de *ringdown*, necessitam que ocorra no sistema uma perturbação capaz de estimular suficientemente os modos de oscilação, mas pequena de modo que possa ser assumido o modelo linearizado. Esta restrição não se aplica ao N4SID, onde podem ser utilizadas parcelas do sinal de dados ambiente.

Como desvantagens da utilização do N4SID para dados ambiente, pode-se citar o maior esforço computacional de processamento dos sinais, pois utiliza-se longas sequências de dados. Outra desvantagem é a necessidade de ajuste de parâmetros do método como tamanho da janela de dados e a ordem a ser considerada. Estes parâmetros são definidos pelo analista que deve levar em conta o tempo de processamento e a carga computacional de acordo com a precisão desejada.

As perspectivas futuras deste trabalho envolvem estudos de processos de filtragem mais eficientes que se adequem a sistemas de distribuição com geradores síncronos e que sejam capazes de minimizar os impactos causados por ruído ambiente nas técnicas da categoria *ringdown*. Outro aspecto a ser explorado são os estudos considerando o desequilíbrio entre as fases (característica frequentemente observada em sistemas de distribuição), e a avaliação da influência deste desequilíbrio sobre a identificação modal utilizando dados ambiente.

Além disso, pode-se explorar, através de pesquisas de sistemas reais e em parceria com empresas distribuidoras, o comportamento real da carga em sistemas de distribuição. Desta forma, as cargas podem ser modeladas da maneira mais realística possível e pode-se avaliar, através de simulações, o impacto deste comportamento e propor melhorias no processo de identificação modal por dados ambiente, como foi apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., & SoDER, L. (2000). *Distributed generation: a definition*. v.57, n.3, p.195 – 204, Electric Power Systems Research.
- ALMEIDA, J. A. (2008). *P&D no Setor Elétrico Brasileiro: um Estudo de Caso na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco*. Recife: UFPE.
- ANDERSON, M., ZHOU, N., PIERRE, J., & WIES, R. (2005). *Bootstrap-based confidence interval estimates for electromechanical modes from multiple output analysis of measured ambient data*. IEEE Trans. Power Systems.
- ANEEL. (2008). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília.
- ANEEL. (2012). *Resolução Normativa nº 482*.
- ANEEL. (2015). *Disponível em www.aneel.gov.br*.
- ANEEL, & PRODIST. (2015). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*.
- BACELAR, M. N. (2013). *Avaliação do desempenho estático e dinâmico de uma microrrede na ocorrência de ilhamentos intencionais*. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE,.
- BOLLEN, M. H., & GU, I. Y. (2006). *Signal Processing of Power Quality Disturbance*. John Wiley and Sons.
- CCEE. (2015). *Disponível em: www.ccee.org.br*.
- CEPEL. (2011). *ANAREDE, Programa de Análise de Redes - Manual do Usuário . V09.07.04*.

- CEPEL. (2012). *ANATEM, Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário*. V10.04.06.
- CEPEL. (2015). *PacDyn Overview*. Disponível em <http://www.pacdyn.cepel.br/>.
- CHAVES, S. B. (2008). *Análise estática e dinâmica de sistemas de potência via aplicativo computacional integrado : ORGANON*. Niterói, RJ: UFF.
- CLAVIJO, D. G. (2008). *Metodos de Subespaços para Identificação de Sistemas: Propostas de Alterações, Implementações e Avaliações*. Campinas: Dissertação de Mestrado, UNICAMP.
- De MARCO, F. J. (2013). *Estimação de Modos de Oscilação Interárea e de Muito Baixas Frequências em Sistemas Elétricos de Potência por Rede de Medidores Fasoriais Sincronizados*. Rio de Janeiro: IME.
- EL-KHATTAM, W., & SALAMA, M. (2004). *Distributed generation technologies, definitions and benefits*. v.71, n.2, p.119 – 128, Electric Power Systems Research.
- FERNANDES, T. C. (2012). *Aplicação de Técnicas de Estimação Modal para Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída*. São Carlos: EESC.
- FERNANDES, T. G., & RAMOS, R. (2013). *Application of modal estimation techniques for small signal stability assessment in distribution systems considering measurement noise*. Grenoble: PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE.
- GERALDI JUNIOR, E. L. (2012). *Estimação Modal para medidas com Ruído em Sistemas com Geração Síncrona Distribuída*. São Carlos: EESC.
- GOMES, S., MARTINS, N., & PORTELA, C. (2003). *Computing Small-Signal Stability Boundaries for Large-Scale Power Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, pp. 747-752, .
- HAUER, A. J., TRUDNOWSKI, D. J., & DESTEESE, J. G. (2007). *A Perspective on WAMS Analysis Tools for Tracking of Oscillatory Dynamics*. Tampa, USA: Proceedings of the IEEE PES General Meeting.

- HAUER, J. F. (1991). *Application of Prony analysis to the determination of modal content and equivalent models for measured power system response*. Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3.
- HAUER, J. F., DEMEURE, C. J., & SCHARF, L. (1990). *Initial results in Prony analysis of power system response signals*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1.
- HAUER, J., DEMEURE, C., & SCHARF, L. (1990). *Initial results in Prony analysis of power system response signals*. IEEE Transactions on Power Systems.
- IEEE. (2013). *Task Force of Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies*.
- IEEE, S. (1989). *IEEE Guide for Interfacing Dispersed Storage and Generation Facilities With Electric Utility Systems*.
- IEEE, S. (2006). *421.5-2005 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*.
- JENKINS, N., ALLAN, R., CROSSLEY, P., KIRSCHEN, D., & STRBAC, G. (2000). *Embedded Generation*. London, UK: The Institution of Engineering and Technology.
- JEREMIAS, T. (2012). *Implementação e Análise de Metodologias de Identificação de Oscilações Eletromecânicas em um Ambiente de Aplicativos para Sincrofasores*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- JOHNSON, M., ZARAFONITIS, I., & CALLIGARIS, M. (2000). *Prony analysis and power system stability-some recent theoretical and applications research*. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE.
- KATAWAMA, T. (2005). *Subspace Methods for System Identification*. USA: Springer.
- KUNDUR, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.

- KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., ANDERSSON, G., BOSE, A., CANIZARES, C., et al. (2004). Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- KUO, B. (1995). *Automatic control systems*. Prentice Hall.
- MARPLE, S. (1987). *Digital Spectral Analysis with Applications*. San Diego: Prentice Hall.
- MATH WORKS, T. (1991). *MATLAB for Windows User's Guide*.
- ONS. (2011). *Procedimentos de Rede*.
- OVERSCHEE, P. V., & DE MOOR, B. (1994). *N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems*. *Automation*, Vol. 311. No. 1. pp. 75-93.
- PARK, S. K. (1988). *Random number generators: Good ones are hard to find*. *Communications of the ACM*, p.1192–1201.
- PHADKE, A. (2002). *Synchronized phasor measurements-a historical overview*. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*.
- PRIOSTE, F. B. (2011). *Detecção e controle de oscilações eletromecânicas usando sistemas de medição fasorial sincronizada*. Santa Catarina : UFSC.
- ROGERS, G. (2000). *Power System Oscillations*.
- SALIM, R. H. (2011). *Uma nova abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos*. São Carlos : EESC.
- SASTRY, S. (1999). *Nonlinear systems: analysis, stability and control*. New York: Springer-Verlag.
- TRUDNOWSKI, D. J., PIERRE, J. W., ZHOU, N., HAUER, J. F., & PARASHAR, M. (2008). *Performance of Three Mode-Meter Block-Processing Algorithms for Automated Dynamic Stability Assessment*. *IEEE Transaction on Power Systems*.

- TRUDNOWSKI, D., & PIERRE, J. (2009). *Overview of algorithms for estimating swing modes from measured responses*. Power Energy Society General Meeting.
- TRUDNOWSKI, D., JOHNSON, J., & HAUER, J. (1999). *Making Prony analysis more accurate using multiple signals*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.1.
- TRUDNOWSKI, D., SMITH, J., SHORT, T., & PIERRE, D. (1991). *An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems*. Power Systems, IEEE Transactions.
- UNICA. (2015). *Disponível em www.unica.com.br*.
- WIES, R., PIERRE, J., & TRUDNOWSKI, D. (2003). *Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-Frequency Electromechanical Modes of Power Systems*. IEEE Trans. Power Systems.
- ZHAO, Y., GAO, Y., HU, Z., YANG, Y., ZHAN, J., & ZHANG, Y. (2009). *A New Method of Identifying the Low Frequency Oscillations of Power Systems*. ICEET, International Conference on.
- ZHOU, N., PIERRE, J. W., & WIES, R. W. (2003). *Estimation of low-frequency electromechanical modes of power systems from ambient measurements using a subspace method*. Proc. North America Power Symp.

APÊNDICES

I - SOLUÇÃO DE UM SISTEMA LINEAR

I.1. Resposta do Sistema Linear a uma Condição Inicial

Um sistema de equações diferenciais lineares pode ser da forma apresentada na equação (I. 1), também conhecida como modelo de estado.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathbf{A}.x + \mathbf{B}.u \\ y &= \mathbf{C}.x + \mathbf{D}.u\end{aligned}\tag{I. 1}$$

onde x é o estado do sistema; u é entrada de controle; y é saída; $\mathbf{A}$ é a matriz de estados com dimensão $n \times n$; $\mathbf{B}$ é a matriz de entrada de controle com dimensão $n \times r$, $\mathbf{C}$ é a matriz de saída com dimensão $m \times n$; e $\mathbf{D}$ é a matriz de transmissão direta com dimensão $m \times r$.

A resposta do sistema a uma condição inicial é capaz de fornecer informações sobre sua estabilidade em um ponto de operação. Em tal consideração, as entradas de controle são nulas e o sistema sujeito a uma condição inicial x_0 é descrito pela equação (I. 2)

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathbf{A}.x \\ x(0) &= x_0\end{aligned}\tag{I. 2}$$

A solução dessa equação pode ser obtida pelo cálculo dos autovalores e autovalores da matriz $\mathbf{A}$. Os autovalores dessa matriz são os parâmetros escalares λ_i que solucionam a igualdade da equação (I. 3).

$$A\Phi = \lambda\Phi \quad (I. 3)$$

onde Φ é vetor de dimensão $n \times 1$. Para encontrar a solução não trivial dessa equação, basta tomar $\det(A - \lambda I) = 0$. Essa igualdade fornece um polinômio de grau n na variável λ e as raízes associadas a este polinômio característico são os autovalores da matriz A .

Os autovetores à direita são os vetores Φ coluna que satisfazem a equação (I. 3) e os autovetores à esquerda são os vetores Ψ linha de dimensão $1 \times n$ que satisfazem a equação (I. 4).

$$\Psi A = \Psi \lambda \quad (I. 4)$$

A partir da obtenção dos autovalores e autovetores e considerando n autovalores distintos, a equação (I. 5) é a solução (ou resposta no tempo) deste sistema se, e só se, λ_i for autovalor de A associado a Φ_i com $c_i \in \mathbb{C}$, $\lambda_i \in \mathbb{C}$ e $\Phi_i \in \mathbb{C}^n$, sendo $\mathbb{C}$ o espaço dos números complexos.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \Phi_i \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \quad (I. 5)$$

onde c_i corresponde ao produto escalar $c_i = \Psi_i \cdot x_{0_i}$.

Observa-se que a resposta do sistema é uma combinação linear dos n autovalores distintos da matriz de estados A . Estes autovalores também são chamados de modo de resposta e fornecem informações sobre a estabilidade do sistema (KUNDUR, 1994). Quando o autovalor é um número real, este corresponde a um modo não oscilatório e indica o amortecimento do sinal. Quando complexo, os autovalores são pares de pólos complexo conjugados e fornecem a informação do amortecimento da oscilação e sua frequência.

Os autovetores à esquerda indicam a contribuição da condição inicial para trajetória do sistema, enquanto os autovetores à direita são responsáveis pela

intensidade com que cada modo está presente em cada variável de estado do sistema (FERNANDES, 2012).

I.2. Resposta Completa de um Sistema Linear

Para o sistema completo da equação (I. 1) sujeito a uma entrada não-nula, a solução do estado do sistema é dado pela equação (I. 6).

$$\mathbf{x}(t) = e^{At} \cdot \mathbf{x}_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (\text{I. 6})$$

Enquanto a resposta da saída do sistema é dada pela equação (I. 7).

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot e^{At} \cdot \mathbf{x}_0 + \int_0^t \mathbf{C} \cdot e^{A(t-\tau)} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(\tau) d\tau + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (\text{I. 7})$$

Essa equação é composta por três parcelas, onde a primeira é a resposta do sistema à condição inicial; a segunda é a influência da entrada $\mathbf{u}(t)$ sobre a dinâmica do estado $\mathbf{x}(t)$; e a terceira é a influência instantânea da entrada $\mathbf{u}(t)$ sobre a saída $\mathbf{y}(t)$.

APÊNDICE II - MODELO DE VARIAÇÃO ALEATÓRIA DAS CARGAS

Figura AII – Modelo CDU para simular variações aleatórias nas cargas no ANATEM